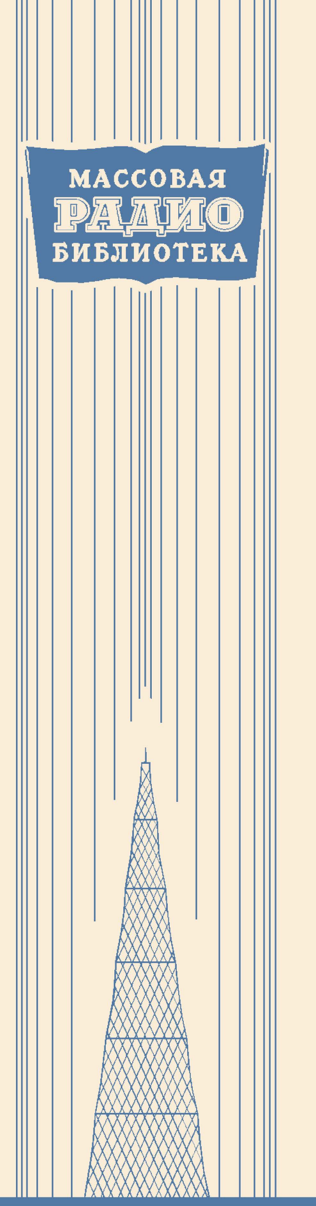
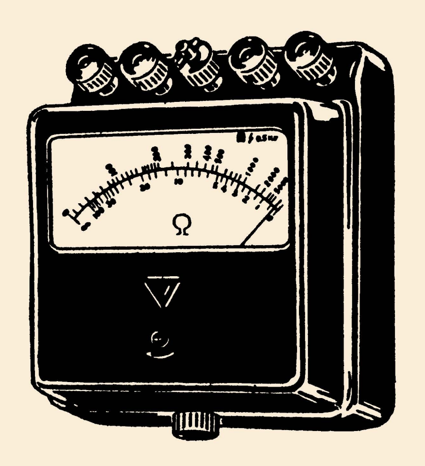


А. М. МЕЕРСОН

ОММЕТРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

1954

Технические данные миллиамперметров и микроамперметров магнитоэлектрической системы, применяемых в омметрах

Тип	Основная погрешность	I	$R_и$	$I_п \cdot R_и$	Длина шкалы	Вес
	%	*ма*	*ом*	*в*	*мм*	*кг*
ПМ-70	±1,5	5 10 15 30 50	15 7,5 5 2,5 1,5	0,075	60	0,3
МК-55	±2,5	5 10 15 30 50	15 7,5 5 2,5 1,5	0,075	55	0,2
М-1 *	±2,5	1 5 10 50	75 15 7,5 1,5	0,075	41,5	Без экрана 0,18, с экраном 0,2
М-2 **	±2,5	1 5 10 50	75 15 7,5 1,5	0,075	61,5	Без экрана 0,33, с экраном 0,37

* Приборы типа М-1 в зависимости от конструктивного оформления (экранированные, неэкранированные, для утопленного монтажа, для выступающего монтажа) имеют следующие обозначения: М-51, М-52, М-53, М-54.

** Приборы типа М-2 в зависимости от конструктивного оформления имеют следующие обозначения: М-41, М-42, М-43, М-44.

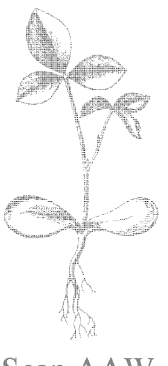
Окончание на 3-й стр. обложки

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 204

А. М. МЕЕРСОН

ОММЕТРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА







ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1954 ЛЕНИНГРАД

В книге излагаются основы теории и методы расчета схем омметров постоянного тока, применяемых для измерения электрических сопротивлений.

Книга рассчитана на подготовленных радиолюбителей, имеющих знания по математике и электротехнике в объеме средней школы. Она может быть также полезна и для лиц, занимающихся конструированием измерительных приборов.

Автор *Анатолий Меерович Меерсон*

Редактор *С. Ф. Корндорф* Техн. редактор *А. М. Фридкин*

Сдано в набор 15/V 1954 г. Подписано к печати 20/VIII 1954 г.
Бумага 82×108[1]/32 — 6,15 п. л. Уч.-изд. л. 6,7
Т-05198 Цена 2 руб. 70 коп. Тираж 15 000 экз. Заказ № 1227

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10

ВВЕДЕНИЕ

В своей практической работе по изготовлению или налаживанию радиотехнической аппаратуры радиолюбитель неизбежно сталкивается с необходимостью измерения *электрических сопротивлений.*

Электрическое сопротивление является важнейшим параметром, характеризующим элементы (детали) электрических цепей—*сопротивления.* Последние широко используются в современной радиоаппаратуре. Любой радиоприемник, любой радиопередатчик, как правило, содержит несколько десятков, а иногда и несколько сотен сопротивлений различных типов. От качества каждого сопротивления и соответствия величины его электрического сопротивления заданному значению зависит качество работы радиоустройства в целом.

Радиолюбителю приходится иметь дело с самыми разнообразными величинами электрических сопротивлений. При контроле соединительных проводников на отсутствие в них обрывов, при проверке обмоток трансформаторов, катушек индуктивности, при подборе шунтов к измерительным приборам возникает необходимость в измерении малых величин электрических сопротивлений, вплоть до сотых и тысячных долей ома. При проверке качества изоляции различных деталей, сопротивления изоляции между обкладками конденсаторов, высокоомных сопротивлений измеряемые величины часто превышают десятки мегом.

Под электрическим сопротивлением понимают свойство тел превращать (при прохождении по ним электрического тока) электрическую энергию в тепловую.

Поэтому величину электрического сопротивления следовало бы определять по количеству тепла, выделяемого в сопротивлении протекающим по нему током. Однако

этот метод измерения электрических сопротивлений очень неудобен и поэтому обычно пользуются более простыми методами: методом вольтметра — амперметра, методом моста и методом омметра.

Метод вольтметра — амперметра применяют при некоторых специальных измерениях (например, измерении сопротивления заземления), а также в тех случаях, когда отсутствуют специальные приборы для измерения электрических сопротивлений. Недостатками этого метода являются громоздкость схемы и необходимость производства вычислений для определения результатов измерения.

Приборы, основанные на *методе моста*, обеспечивают высокую точность измерения. Их недостатки — сравнительно сложное устройство и управление, а также сравнительно высокая стоимость.

В радиолюбительской практике для измерения электрических сопротивлений наиболее широко применяют *омметры постоянного тока*. Простые по устройству и удобные в эксплуатации, они в то же время обеспечивают удовлетворительную для технических целей точность измерения. Омметры часто объединяют с другими измерительными приборами—амперметрами, вольтметрами и т. д.— в комбинированные измерительные приборы, обычно называемые ампервольтомметрами или сокращенно *авометрами*.

Омметрами постоянного тока называют приборы, предназначенные для измерения электрических сопротивлений и позволяющие производить непосредственный отсчет измеряемой величины по шкале их индикатора. Работа омметров основана на использовании закона Ома:

$$I = \frac{U}{R},$$

определяющего зависимость величины тока в электрической цепи I от величины ее электрического сопротивления R при заданной величине напряжения U, подведенного к электрической цепи.

Омметр постоянного тока состоит из трех основных частей:

1) источника питания постоянного тока;
2) индикатора постоянного тока;
3) набора добавочных и шунтирующих сопротивлений.

По типу применяемого источника питания омметры могут быть подразделены на батарейные, индукторные и сетевые.

Источниками питания *батарейных омметров*, получивших наибольшее распространение в радиолюбительской практике и предназначенных для измерения электрических сопротивлений средних величин (примерно от 1 *ом* до нескольких мегом), обычно служат *сухие элементы* типа ФБС или батареи карманного фонаря типа КБС. В них также могут использоваться *сухие батареи* БАС-60, БАС-80 или какого-либо другого типа и, наконец, отдельные элементы от этих батарей.

Для питания омметров, измеряющих электрические сопротивления малой величины, применяются *аккумуляторные батареи*, допускающие значительный разрядный ток в цепи питания. В этом случае могут быть использованы также накальные сухие батареи.

Для питания омметров, рассчитанных на измерение больших электрических сопротивлений (свыше 1 *мгом*), иногда в схему питания омметра вводят *вибропреобразователь*, работающий от низковольтной аккумуляторной батареи и служащий для повышения напряжения питания до нескольких сотен вольт.

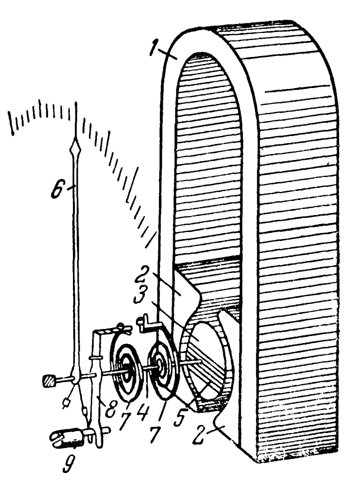
Индукторные омметры применяются главным образом для измерения электрических сопротивлений больших величин, например сопротивления изоляции. Такие омметры получили название *мегомметров*. Источниками питания в них являются *индукторы*, представляющие собой малогабаритные магнитоэлектрические генераторы с ручным приводом мощностью до 10 *вт*, позволяющие получить постоянное напряжение порядка сотен или тысяч вольт. К индукторным омметрам относятся отечественные приборы типов М-1101, МС-06 и МС-07.

Сетевые омметры применяются обычно для измерения электрических сопротивлений средних и больших величин и реже для измерения электрических сопротивлений малой величины. Источником питания для них служит *сеть переменного* или *постоянного тока*. Омметры, рассчитанные на питание от сети переменного тока, должны содержать ламповый или селеновый выпрямитель.

Основной частью омметра, в значительной степени определяющей его свойства и возможности, является *индикатор*, служащий для отсчета величины измеряемого сопротивления. Обычно в омметрах в качестве индикаторов

применяются *стрелочные однорамочные измерительные индикаторы магнитоэлектрической системы.*

Устройство такого индикатора показано на фиг. 1. Он содержит сильный подковообразный магнит *1*, к концам которого прикреплены полюсные наконечники *2* из мягкой стали. Между полюсными наконечниками расположен неподвижный стальной сердечник *3* цилиндрической формы. В воздушном зазоре между полюсными наконечниками и сердечником создается равномерное магнитное поле, силовые линии которого направлены перпендикулярно к поверхности цилиндра. В воздушном зазоре помещается алюминиевый каркас прямоугольной формы, который может свободно поворачиваться вместе с осью *4*, на которой он закреплен. На каркасе тонким медным изолированным проводом (диаметром 0,02 ÷ 0,2 *мм*) намотана рамка *5*. На одной оси с рамкой укреплена стрелка *6*, конец которой перемещается по шкале. Спиральные пружинки *7* служат для создания момента, противодействующего повороту рамки, а также для подвода тока к рамке. Поводок *8*, к которому прикреплен конец одной из пружин, предназначен для установки стрелки на нуль. Управление поводком производится поворотом отверткой эксцентрика *9*.



Фиг. 1. Устройство однорамочного измерительного индикатора магнитоэлектрической системы.

При пропускании тока по виткам рамки образующийся вокруг рамки магнитный поток будет взаимодействовать с магнитным потоком постоянного магнита. При этом создается вращающий момент, под действием которого подвижная часть механизма поворачивается до тех пор, пока противодействующий момент, создаваемый спиральными пружинками, не уравновесит вращающий момент. Благодаря равномерности постоянного магнитного поля в воздушном зазоре вращающий момент, а следовательно, и угол отклонения стрелки механизма оказываются пропорциональными величине тока, протекающего по виткам рамки.

Индикаторы подобной конструкции (миллиамперметры и микроамперметры) в большом количестве выпускаются отечественной промышленностью и легко могут быть приобретены радиолюбителем.

При расчете схемы омметра необходимо знать электрические данные индикатора, а именно ток полного отклонения I_n, вызывающий отклонение стрелки индикатора на всю шкалу, и сопротивление рамки индикатора R_u. Ток полного отклонения индикаторов, используемых в омметрах, предназначенных для измерения электрических сопротивлений средних и больших величин, колеблется в широких пределах, примерно от 50 *мка* до 10 *ма*. В омметрах, измеряющих малые электрические сопротивления, обычно применяются индикаторы менее чувствительные, ток полного отклонения которых иногда достигает нескольких сотен миллиампер или даже единиц ампер. Падение напряжения на зажимах индикатора $I_n \cdot R_u$, необходимое для отклонения стрелки на всю шкалу, обычно лежит в пределах $0{,}03 \div 0{,}25$ *в*. Чем чувствительнее индикатор (т. е. чем меньше его ток I_n), тем больше витков более тонкого провода имеет его рамка и тем больше сопротивление R_u. Повышение чувствительности может быть достигнуто также применением в измерительном механизме более сильного постоянного магнита и пружин с меньшим противодействующим моментом.

В некоторых специальных типах омметров заводского выпуска используются двухрамочные измерительные индикаторы магнитоэлектрической системы — *логометры*. Омметры с логометрическим индикатором обладают весьма ценным свойством — малой зависимостью результатов измерения от напряжения питания. Однако ввиду ограниченного выпуска логометрических индикаторов в любительских приборах они не получили широкого распространения.

В последние годы для измерения электрических сопротивлений начали применять *ламповые омметры*. Омметры этого типа по принципу действия приближаются к ламповым вольтметрам. Их основной частью является ламповый измерительный каскад, в анодной цепи которого включен индикатор магнитоэлектрической системы. Измеряемое сопротивление включается в цепь управляющей сетки лампы измерительного каскада. От величины измеряемого электрического сопротивления зависит потенциал

сетки и, следовательно, величина анодного тока, регистрируемого индикатором. В качестве индикаторов в ламповых омметрах иногда используют электронные лампы типа 6Е5С (индикатор настройки). Питание таких омметров производится от сети переменного тока через ламповый или селеновый выпрямитель, или непосредственно от источников постоянного напряжения. Более подробные сведения о ламповых омметрах читатель может найти в специальной литературе, список которой приводится в конце книги.

В данной книге рассматриваются вопросы теории, расчета и принципы конструирования батарейных и сетевых омметров постоянного тока, которые до последнего времени еще не получили достаточного освещения в литературе. Отдельные вопросы теории и расчета омметров постоянного тока были развиты в работах советских специалистов Е. А. Свирского, В. О. Арутюнова, Г. Г. Гинкина, А. Ф. Шевцова и др.

Схемы омметров постоянного тока разделяются на две основные группы:

1) *последовательные схемы*, применяемые для измерения электрических сопротивлений средних и больших величин (от 1 *ом* и выше);

2) *параллельные схемы*, применяемые для измерения малых электрических сопротивлений.

В омметрах, предназначенных для измерения как больших, так и малых электрических сопротивлений, часто используется *последовательно-параллельная схема*, представляющая собой сочетание двух указанных выше схем.

Глава первая

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ СХЕМ ОММЕТРОВ

1. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ СХЕМА ОММЕТРА

Простейшая схема омметра, изображенная на фиг. 2, представляет собой последовательное соединение источника питания с напряжением U, добавочного сопротивления $R_д$, индикатора магнитоэлектрической системы *И* с внутренним сопротивлением $R_и$ и зажимов *1* и *2*, к которым подключается измеряемое сопротивление R_x.

Внутреннее сопротивление источника питания обычно бывает значительно меньше сопротивления других элементов схемы омметра и в большинстве случаев при отсутствии специальных оговорок им можно пренебречь.

Величина добавочного .сопротивления $R_д$ выбирается такой, чтобы при коротком замыкании зажимов *1* и *2* (т. е. при $R_x=0$) стрелка индикатора отклонялась на всю шкалу. При этом через индикатор будет протекать ток полного отклонения

$$I_п=\frac{U}{R_д+R_и}.$$

Фиг. 2. Простейшая последовательная схема омметра.

Из этого выражения можно определить требуемую величину добавочного сопротивления

$$R_д=\frac{U}{I_п}-R_и. \qquad (1)$$

Входным сопротивлением омметра R_i называется сопротивление его схемы между зажимами *1* и *2*. Для рассматриваемой схемы

$$R_i=R_д+R_и=\frac{U}{I_п}. \qquad (2)$$

Входное сопротивление омметра для данной схемы целиком определяется напряжением питания и током полного отклонения индикатора.

Выясним характер шкалы омметра.

При $R_x=0$ через индикатор протекает наибольший ток

$$I_п=\frac{U}{R_i}.$$

При подключении к зажимам *1* и *2* сопротивления R_x ток через индикатор уменьшается до значения

$$I_x=\frac{U}{R_i+R_x}.$$

Отношение токов

$$\frac{I_x}{I_п}=\frac{R_i}{R_i+R_x}=\frac{1}{1+\frac{R_x}{R_i}}. \qquad (3)$$

Формула (3) определяет градуировку шкалы омметра. При известном входном сопротивлении R_i она позволяет вычислить для каждого значения R_x соответствующее ему отношение $\frac{I_x}{I_n}$, полностью определяющее положение соответствующего деления на шкале. Отношение $\frac{I_x}{I_n}$ показывает, на какую долю шкалы отклоняется стрелка индикатора при измерении R_x, если при $R_x = 0$ она отклоняется на всю шкалу. Например, отношение $\frac{I_x}{I_n} = 0{,}3$ соответствует отклонению стрелки индикатора на 30% от общей длины шкалы.

Пользуясь формулой (3), можно определить три характерные точки шкалы омметра:

1. При $R_x = 0$, $\frac{I_x}{I_n} = 1$, $I_x = I_n$. Стрелка индикатора отклоняется на всю шкалу.

2. При $R_x = \infty$ (цепь разорвана), $\frac{I_x}{I_n} = 0$, $I_x = 0$. Стрелка индикатора не отклоняется.

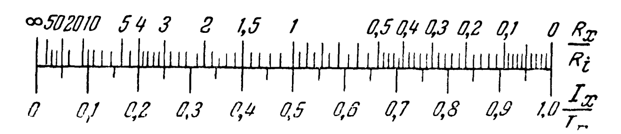
3. При $R_x = R_i$, $\frac{I_x}{I_n} = \frac{1}{2}$, $I_x = \frac{I_n}{2}$. Отсюда видно, что середине шкалы омметра соответствует измеряемое сопротивление, равное входному. Это объясняется тем, что при $R_x = R_i$ сопротивление цепи омметра по сравнению со случаем, когда $R_x = 0$, увеличивается в 2 раза, а ток через индикатор в 2 раза уменьшается.

Из формулы (3) видно, что характер шкалы последовательных схем омметров не зависит от величины их входного сопротивления, а отклонение стрелки индикатора определяется лишь соотношением между величиной измеряемого сопротивления и входным сопротивлением.

На фиг. 3 вверху приведена развернутая шкала омметра, рассчитанная по формуле (3) и справедливая для случая любого входного сопротивления R_i, принятого за единицу; в нижней части фигуры показано изменение вдоль шкалы отношения $\frac{I_x}{I_n}$, пропорционально которому отклоняется стрелка индикатора. Отметки на шкале будут справедливы (в соответствующих единицах) для омметров, имеющих

входное сопротивление, равное 1 *ом*, 1 *ком*, 1 *мгом* и т. д. При других входных сопротивлениях отсчет по шкале следует умножить на соответствующий множитель. Например, при $R_i = 10$ *ком*, чтобы получить отсчет в килоомах, показания шкалы необходимо умножать на 10, при $R_i = 100$ *ком* — на 100 и т. д.

Шкала омметра имеет градуировку от 0 (нуля) до ∞ (бесконечности). Однако практический предел измерений ограничивается точностью отсчета величины R_x на крайних участках шкалы, где вследствие неравномерного характера шкалы точность измерений резко падает. Крайние значащие деления, которые удается нанести на шкалу, лежат со стороны малых сопротивлений в пределах $\frac{R_i}{20} \div \frac{R_i}{100}$, а со стороны больших сопротивлений — в пределах $20 R_i \div 100 R_i$. Следовательно, входное сопротивление омметра определяет порядок измеряемых омметром электрических сопротивлений.



Фиг. 3. Развернутая шкала последовательной схемы омметра.

Из формулы (2) видно, что необходимое входное сопротивление можно получить, как подбирая напряжение питания, так и выбирая соответствующий индикатор. Чем чувствительнее индикатор (т. е. чем меньше его ток I_n), тем меньшее напряжение питания будет соответствовать данному входному сопротивлению.

Пример 1. Рассчитать последовательную схему омметра, работающего с микроамперметром типа М-592, имеющим следующие данные: $I_n = 300$ *мка*, $R_u = 500$ *ом*. Питание омметра производится от двух последовательно соединенных сухих элементов, дающих общее напряжение $U = 3$ *в*.

1. По формуле (2) находим входное сопротивление омметра

$$R_i = \frac{3}{300 \cdot 10^{-6}} = 10\,000 \text{ ом}.$$

2. Определяем величину добавочного сопротивления

$$R_д = R_i - R_u = 10\,000 - 500 = 9\,500 \text{ ом}.$$

3. Градуировка шкалы омметра в килоомах определяется формулой (3) при подстановке в нее $R_i = 10$ *ком*.

При использовании шкалы, приведенной на фиг. 3, отсчет по ней следует умножать на 10. При этом пределы измерения примерно составят:

$$\frac{R_i}{50} \div 50\,R_i = 200 \text{ ом} \div 500 \text{ ком}.$$

2. О ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЙ ОММЕТРАМИ

Омметры, как и другие измерительные приборы, характеризуются точностью измерений. Количественно точность измерений оценивается величиной основной и дополнительной относительных погрешностей прибора.

Основная относительная погрешность показаний омметра определяется в процентах от его показания и соответствует его работе в нормальных условиях. Величина этой погрешности в значительной степени зависит от качества используемого в омметре индикатора.

У приборов с равномерной шкалой (вольтметров, амперметров, миллиамперметров магнитоэлектрической системы и т. д.) основная относительная погрешность, определяемая в процентах от верхнего предела измерений прибора, для всех точек шкалы приблизительно одинакова и в зависимости от класса точности прибора не превосходит 0,2, 0,5, 1,0, 1,5 и 2,5% для приборов соответственно классов 0,2, 0,5, 1,0, 1,5 и 2,5. Эта погрешность обусловливается трением в опорах измерительного механизма, неточностями градуировки, установки шкалы, отсчета по ней и другими факторами.

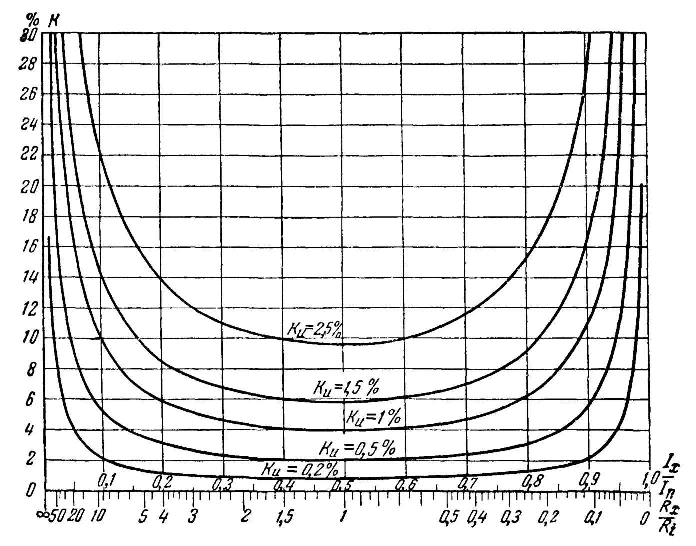
Вследствие неравномерного характера шкалы омметра точность измерения на различных участках шкалы не одинакова.

Исследования показывают, что величина основной относительной погрешности омметра K в любой точке шкалы определяется формулой

$$K\,\% = \frac{K_u\,\%}{\left(\frac{I_x}{I_n} + K_u\right)\left(1 - \frac{I_x}{I_n}\right)},$$

где $K_u\%$ — основная относительная погрешность индикатора омметра, выраженная в процентах и численно равная его классу точности, а K_u — величина той же погрешности в относительных единицах. Например, для индикатора класса 1,0 $K_u\% = 1\%$, а $K_u = 0{,}01$.

На фиг. 4 приведены кривые изменения основной относительной погрешности омметра вдоль шкалы при использовании индикаторов различных классов. Из этих



Фиг. 4. График основной погрешности последовательных схем омметров.

кривых видно, что для среднего участка шкалы погрешность оказывается наименьшей, а по мере приближения к краям шкалы она быстро возрастает. Отсюда следует вывод, что при проведении сравнительно точных измерений необходимо использовать лишь центральный участок шкалы; крайние же участки могут служить только для приближенного определения величины измеряемых сопротивлений. По этой же причине в большинстве практических случаев можно пренебречь некоторой несимметричностью на крайних участках шкалы кривых, приведенных на фиг. 4, по отношению к середине графика и считать их симметричными. При таком допущении пределы измерений будут также расположены симметрично относительно точки на шкале, соответствующей $R_x = R_i$.

График фиг. 4 указывает на резкую зависимость величины основной относительной погрешности омметра от класса примененного в нем индикатора. Например, при индикаторе класса 0,5 для середины шкалы омметра $K \approx 2\%$, а при индикаторе класса 2,5 $K \approx 9{,}6\%$. Следовательно, в омметрах желательно применять индикаторы, имеющие возможно меньшую погрешность K_u.

Класс точности индикатора и максимальная величина основной относительной погрешности $K_{макс}$, допускаемая на краях рабочего участка шкалы, ограничивают пределы измерения омметра. Это вытекает из рассмотрения кривых фиг. 4, которые позволяют для выбранного типа индикатора найти граничные значения $\frac{R_{x\,макс}}{R_i}$ и $\frac{R_{x\,мин}}{R_i}$, удовлетворяющие заданной допустимой погрешности $K_{макс}$. Частное от деления этих значений дает допустимую величину отношения $\frac{R_{x\,макс}}{R_{x\,мин}}$, исходя из которого можно выбрать конкретные пределы измерений $R_{x\,макс} \div R_{x\,мин}$. Например, при использовании в омметре индикатора типа ПМ-70 класса 1,5 и допустимом значении $K_{макс} = 15\%$: $\frac{R_{x\,макс}}{R_i} \approx 10{,}8$, $\frac{R_{x\,мин}}{R_i} \approx 0{,}124$, а $\frac{R_{x\,макс}}{R_{x\,мин}} \approx 90$.

Исходя из формулы (3), можно доказать, что для значений $R_{x\,макс}$ и $R_{x\,мин}$, симметрично расположенных относительно середины шкалы, будет справедливо равенство

$$\frac{R_{x\,макс}}{R_i} = \frac{R_i}{R_{x\,мин}}.$$

Поэтому расчетную величину входного сопротивления омметра приближенно следует определять по формуле

$$R_i \approx \sqrt{R_{x\,мин} \cdot R_{x\,макс}}, \qquad (4)$$

округляя полученное значение до ближайшей удобной для расчета величины. Например, если, исходя из соотношения $\frac{R_{x\,макс}}{R_{x\,мин}} = 90$, задаться пределом измерения $10 \div 900$ *ом*, то входное сопротивление $R_i \approx \sqrt{10 \cdot 900} \approx 95$ *ом*. Для удобства расчета можно взять $R_i = 100$ *ом*. При этом для заданных значений $R_{x\,мин}$ и $R_{x\,макс}$ величина

$K_{макс}$ может оказаться несколько различной, что практически не особенно существенно.

Из формулы (4) видно, что входное сопротивление омметра, определяющее градуировку его шкалы, приближенно представляет ссбой среднее геометрическое из максимального и минимального значений R_x на границах рабочего участка шкалы. Поэтому иногда при расчете омметра оказывается практически удобным, исходя из желаемого порядка величин измеряемых сопротивлений, задаваться расчетной величиной входного сопротивления R_i, а затем в соответствии с классом точности индикатора и выбранной допустимой величиной $K_{макс}$ определять конкретные пределы измерений $R_{x\,мин} \div R_{x\,макс}$.

Действительные условия работы омметра могут отличаться от нормальных услсвий, при которых производилась его градуировка. Это вызывает появление дополнительных погрешностей измерений. Для омметров наибольшее значение имеют дополнительные погрешности, обусловленные изменением внешней температуры и напряжения питания.

Исследсвания показывают, что в пределах рабочей части шкалы дополнительная погрешность, вызываемая изменением температуры на 10° (примерно в интервале температур от —20° до +40°), обычно не превышает по величине основной относительной погрешности индикатора. Так, например, при работе омметра с индикатором класса 1,5 можно считать, что изменение температуры на каждые 10° относительно нормального значения (обычно равного +20°) может вызвать возрастание погрешности показаний не более чем на ±1,5%.

Влияние изменения напряжения питания на работу омметра можно рассмотреть на примере простейшей схемы фиг. 2. Если в этой схеме напряжение питания отличается от расчетного значения U, то при $R_x = 0$ стрелка индикатора не будет устанавливаться на нуль шкалы, что может привести к появлению очень большой дополнительной погрешности. При напряжении, превышающем расчетное, омметр будет давать заниженные показания при напряжении, меньшем расчетного, — завышенные показания. В первом случае при $R_x = 0$ стрелка будет уходить за пределы шкалы, а во втором случае положение стрелки будет соответствовать тем большему значению сопротивления, чем меньше будет напряжение. По этой причине

омметр, собранный по схеме фиг. 2, обычно находит применение лишь как *пробник* для проверки отсутствия обрывов в электрических цепях.

Устранить влияние непостоянства напряжения питания на результаты измерений можно, используя в схеме омметра либо особый тип индикатора — логометр, либо применяя один из методов так называемой *установки „нуля"*.

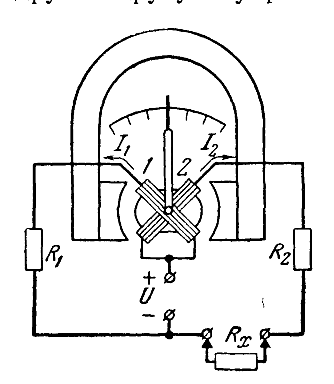
Глава вторая

ОММЕТРЫ С ИНДИКАТОРАМИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТИПОВ

3. ОММЕТРЫ С ЛОГОМЕТРИЧЕСКИМ ИНДИКАТОРОМ

Логометры, применяемые в схемах омметров, представляют собой индикаторы магнитоэлектрической системы с двумя рамками, расположенными под некоторым углом друг к другу и укрепленными на одной оси со стрелкой.

Устройство логометра и включение его в схему омметра показаны на фиг. 5. Ток к рамкам подводится с помощью гибких ленточек, практически не создающих противодействия повороту рамок. Поэтому при отсутствии тока в рамках подвижная часть находится в положении безразличного равновесия. В зазоре между полюсными наконечниками и сердечником создается неравномерное магнитное поле. Неравномерность магнитной индукции в зазоре достигается либо применением стального сердечника, имеющего в сечении эллиптическую форму, как это показано на фиг. 5, либо особой формой полюсных наконечников при цилиндрической форме сердечника.



Фиг. 5. Схема омметра с логометрическим индикатором.

Цепи обеих рамок логометра подключаются к одному и тому же источнику питания. В цепи одной из рамок включено известное сопротивление R_1. Измеряемое сопротивление R_x включают последовательно с добавочным сопротивлением R_2 в цепь другой рамки. Через рамки текут токи I_1 и I_2, магнитные поля которых в результате взаимо-

действия с полем постоянного магнита создают вращающие моменты противоположных направлений.

Вращающие моменты, действующие на рамки, пропорциональны величине тока в рамках и магнитной индукции в зазоре. Так как магнитная индукция в зазоре логометра распределена неравномерно, то величина вращающего момента каждой рамки оказывается зависящей от положения, занимаемого рамкой в зазоре в данный момент, т. е. от угла поворота подвижной системы. Система устанавливается в такое положение, при котором встречные вращающие моменты рамок равны друг другу. Это положение равновесия зависит лишь от отношения токов $\frac{I_2}{I_1}$, протекающих через рамки, и не зависит (в определенных пределах) от абсолютной величины этих токов.

Изменение напряжения источника питания не влияет на показания прибора, так как оно приводит к пропорциональному изменению токов I_2 и I_1 при сохранении постоянства их отношения. Однако при очень сильном уменьшении рабочего напряжения (на 70—80% от номинального напряжения, на которое рассчитан прибор) показания логометра могут быть ошибочны, так как при малых токах начинает сказываться трение оси его подвижной системы.

Рамки включены в параллельные ветви, и поэтому токи в них распределяются обратно пропорционально сопротивлениям этих ветвей, т. е.

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_1}{R_2 + R_x}$$

(собственные сопротивления рамок считаем входящими в величины добавочных сопротивлений R_1 и R_2). Так как сопротивления R_1 и R_2 постоянные, то угол поворота подвижной системы логометра зависит лишь от величины измеряемого сопротивления, что позволяет шкалу логометра градуировать в значениях R_x.

Добавочные сопротивления R_1 и R_2 выбираются такой величины, чтобы при $R_x = \infty$ стрелка индикатора под действием вращающего момента рамки *1* отклонилась в одно крайнее положение, а при $R_x = 0$ под действием преобладающего момента рамки *2* — в противоположное крайнее положение.

Градуировку шкалы логометра расчетным путем в любительских условиях выполнить трудно, тем более, что не всегда известен закон распределения магнитной индукции в зазоре. Поэтому градуировку подобного прибора рекомендуется выполнять опытным путем, используя сопротивления известной величины.

В фабричной аппаратуре питание рамок логометров часто производится от индукторов с ручным приводом, помещаемых внутри кожуха прибора и снабжаемых редуктором, обеспечивающим вращение якоря со скоростью 2 000 — 3 000 об/мин при скорости вращения рукоятки порядка 120 об/мин. Имеющие при этом место колебания выходного напряжения индуктора в пределах 10 — 15% от нормального значения не влияют на показания омметра.

Индукторные омметры с логометрическим индикатором широко применяются в различных областях техники, главным образом для испытания качества изоляции кабелей, отдельных проводов и электрических установок (мегомметры типов М-1101 и МС-06). Их достоинством является наличие внутреннего источника питания, дающего высокое напряжение, что позволяет использовать эти приборы как переносные в самых разнообразных условиях эксплуатации.

Отечественной промышленностью выпускаются различные типы омметров с логометрическими индикаторами. В качестве примера можно привести *омметр типа М-218*. Прибор имеет восемь пределов измерений, перекрывающих диапазон сопротивлений от 0,1 *ом* до 10 *мгом*. Для питания прибора требуются постоянные напряжения 6 и 250 *в*.

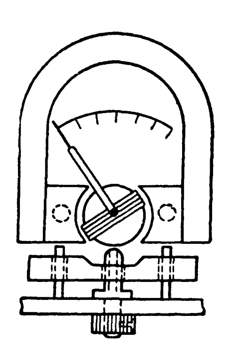
В качестве источника питания могут служить сеть переменного тока напряжением 110, 127 или 220 *в* и частотой от 50 до 800 *гц* или низковольтные (6-*в*) сухие или аккумуляторные батареи. При питании омметра от сети используется силовой трансформатор и два селеновых выпрямителя (низковольтный и высоковольтный). При питании от сухих или аккумуляторных батарей применяется вибропреобразователь типа П-41, позволяющий получить постоянное напряжение 250 *в*.

Для измерения очень малых сопротивлений (в пределах 2 *мком* ÷ 1 *ом*) применяют пятипредельный логометрический *микроомметр типа М-246*. Питание прибора производится от сети переменного тока или от аккумулятора емкостью не менее 45 *ач* и напряжением 2,5±0,5 *в*

4. ОММЕТРЫ С МАГНИТНЫМ ШУНТОМ

В омметрах с обычными однорамочными индикаторами магнитоэлектрической системы для установки стрелки индикатора перед началом измерений на „нуль“ обычно используется магнитный шунт или электрический регулятор в виде переменного сопротивления или потенциометра.

Магнитный шунт представляет собой стальную пластинку, расположенную вблизи полюсных наконечников магнитной системы индикатора. Магнитный поток постоянного магнита частично замыкается через эту пластинку. Возможная конструкция магнитной системы индикатора с магнитным шунтом показана на фиг. 6.



Фиг. 6. Магнитная система индикатора магнитоэлектрической системы с магнитным шунтом.

Перемещение магнитного шунта относительно полюсных наконечников приводит к изменению плотности магнитного потока в зазоре. Например, если приблизить шунт к полюсным наконечникам, то вследствие увеличения магнитного потока, замыкающегося через него, уменьшится величина магнитного потока, воздействующего на подвижную систему индикатора. В результате этого отклонение стрелки индикатора несколько уменьшится. Таким образом, изменение положения магнитного шунта позволяет в некоторых пределах изменять ток полного отклонения индикатора I_n, а следовательно, и чувствительность индикатора.

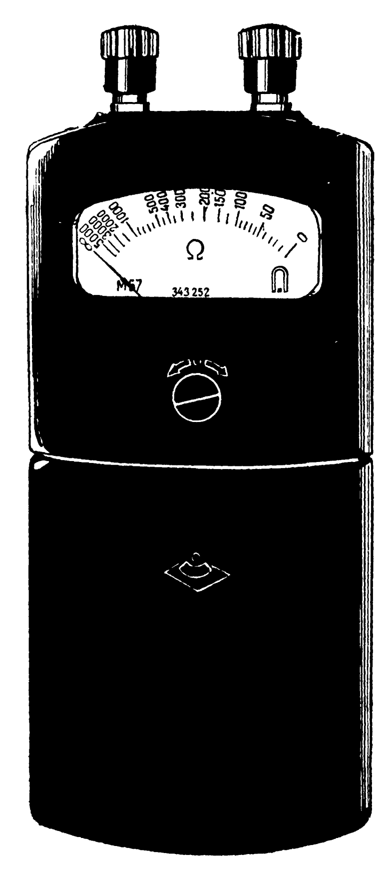
Управление магнитным шунтом производится с лицевой, боковой или задней панели прибора при помощи отвертки или специальной ручки.

Омметр с магнитным шунтом собирается по схеме фиг. 2. Изменение напряжения питания компенсируется пропорциональным изменением тока полного отклонения I_n, производимым в процессе установки „нуля“ (при $R_x = 0$). Например, если напряжение питания вследствие разряда батареи уменьшится на 10%, то посредством магнитного шунта соответственно повышают чувствительность индикатора, понижая ток полного отклонения на 10%.

Основным достоинством омметра с магнитным шунтом является то, что его входное сопротивление, опре-

2*

деляющее градуировку шкалы, постоянно и не зависит от напряжения питания. Поэтому при достаточно тщательной установке „нуля“ изменение напряжения питания не вызывает дополнительной погрешности и точность измерения определяется главным образом основной погрешностью омметра.



Фиг. 7. Омметр типа М-57.

Однако, несмотря на то, что омметры с магнитными шунтами позволяют получить сравнительно высокую точность измерений, область их применения ограничивается теми типами фабричной аппаратуры, в которых индикатор омметра не используется для измерения токов и напряжений. К приборам подобного типа относятся омметры типа М-57, М-93 и М-471, в которых магнитный шунт обеспечивает установку „нуля“ при уменьшении напряжения питания в пределах 15% от максимального допустимого значения. Общий вид омметра типа М-57, имеющего входное сопротивление $R_i = 200$ *ом*, показан на фиг. 7

В настоящее время в эксплуатации широко распространены комбинированные приборы, в которых один и тот же индикатор используется как в схеме омметра, так и в схемах измерения напряжения, тока и т. д. В подобных приборах применение индикаторов с регулируемым при измерении сопротивлений магнитным шунтом недопустимо, так как изменяющаяся чувствительность индикатора понизит точность измерения других электрических величин. Поэтому в комбинированных приборах применяют схемы омметров, в которых компенсация изменения напряжения питания производится с помощью переменных сопротив-

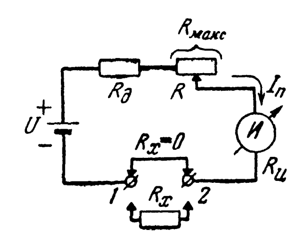
лений, которые используются либо для регулировки напряжения на выходе выпрямителя (в сетевых омметрах), либо для гашения излишка питающего напряжения или шунтирования индикатора (в батарейных омметрах).

Глава третья

ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ БАТАРЕЙНЫХ ОММЕТРОВ

5. ОММЕТРЫ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ РЕГУЛЯТОРА „НУЛЯ"

Схема омметра, приведенная на фиг. 8, рассчитывается на работу при напряжении источника питания, лежащем в некоторых пределах $U_{макс}-U_{мин}$. Для уменьшения влияния непостоянства питающего напряжения на точность измерений служит включенный в схему последовательно реостат R.



Фиг. 8. Схема омметра с последовательным включением регулятора „нуля".

Величина добавочного сопротивления $R_д$ выбирается такой, чтобы при минимально допустимом напряжении питания $U_{мин}$, полностью выведенном реостате установки „нуля" ($R=0$) и замкнутых накоротко зажимах *1* и *2* ($R_x=0$) стрелка индикатора отклонялась на всю шкалу. При этом через индикатор протекает ток полного отклонения

$$I_п=\frac{U_{мин}}{R_д+R_и},$$

откуда

$$R_д=\frac{U_{мин}}{I_п}-R_и. \qquad (5)$$

Если же омметр работает при напряжении, превышающем минимальное, то перед началом измерений для установки стрелки индикатора на „нуль" вводится реостат R, уменьшающий величину тока в цепи до $I_п$.

Полное сопротивление реостата $R_{макс}$ должно обеспечивать возможность установки „нуля" при максимально возможном напряжении питания $U_{макс}$. Так как при этом на реостате должен гаситься излишек напряжения

$U_{макс} - U_{мин}$, то его полное сопротивление следует выбирать, исходя из условия

$$R_{макс} \geqslant \frac{U_{макс} - U_{мин}}{I_n}. \qquad (6)$$

В любой последовательной схеме омметра, в которой произведена предварительная установка „нуля“, ток в цепи индикатора при подключении измеряемого сопротивления R_x изменяется по одному и тому же закону, определяемому формулой (3), выведенной для схемы фиг. 2.

Это вытекает из того, что при данном напряжении питания все элементы схемы имеют вполне определенные значения и путем пересчета отдельных элементов такую схему можно привести к схеме фиг. 2. Последнее справедливо и для схемы фиг. 8, если в качестве добавочного сопротивления рассматривать сумму сопротивлений $R_д + R$. Если даже индикатор омметра зашунтирован сопротивлениями (как это имеет место в схемах фиг. 9, 10 и 11), то приведенная выше формула градуировки остается справедливой, так как изменение тока в цепи питания, происходящее при включении измеряемого сопротивления R_x, вызывает пропорциональное изменение тока в цепи индикатора.

Если обозначить через R_{i0} входное сопротивление омметра при расчетном напряжении источника питания U_0, то, очевидно, градуировка шкал омметров, работающих по последовательной схеме любого типа, может производиться по формуле (3), если в ней принять $R_i = R_{i0}$.

Решив формулу (3) относительно R_x, находим:

$$R_x = R_i \frac{1 - \frac{I_x}{I_n}}{\frac{I_x}{I_n}}.$$

Следовательно, в каждой точке шкалы показания омметра пропорциональны величине его входного сопротивления. Эти показания будут соответствовать истинной величине измеряемого сопротивления только при $R_i = R_{i0}$.

Входное сопротивление рассматриваемой схемы фиг. 8

$$R_i = R_д + R + R_и = \frac{U}{I_n}. \qquad (7)$$

При изменении напряжения питания U изменяется необходимая величина сопротивления реостата R, а следовательно, и входное сопротивление омметра. Это приводит к появлению дополнительной погрешности измерений.

Обозначим относительную величину изменения напряжения питания через

$$\varepsilon = \frac{U_0 - U}{U_0},$$

а вызванную этим изменением величину относительной дополнительной погрешности омметра через

$$K_\partial = \frac{R_{x0} - R_x}{R_{x0}},$$

где R_{x0} — показание омметра при расчетном напряжении питания U_0, а R_x — показание омметра при измерении того же сопротивления и напряжении питания U, отличном от U_0.

Из приведенных выше формул следует, что для схемы фиг. 8

$$K_\partial = \frac{R_{x0} - R_{x1}}{R_{x0}} = \frac{R_{i0} - R_i}{R_{i0}} = \frac{U_0 - U}{U_0} = \varepsilon,$$

т. е. относительная дополнительная погрешность омметра равна относительному изменению напряжения питания. Так, например, если напряжение питания отличается от расчетного на 20%, то для любой точки шкалы дополнительная погрешность составляет 20%.

Величину дополнительной погрешности можно уменьшить по абсолютной величине примерно в 2 раза, если производить градуировку шкалы при напряжении питания

$$U_0 = \frac{U_{макс} + U_{мин}}{2},$$

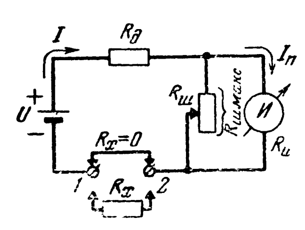
которому соответствует входное сопротивление

$$R_{i0} = \frac{U_0}{I_n}.$$

Вследствие значительной погрешности, возникающей при изменении напряжения питания, данная схема омметра используется весьма редко, главным образом в омметрах, работающих по комбинированной (последовательно-параллельной) схеме. В фабричной аппаратуре она применялась лишь в универсальном приборе типа ТА-4, выпускавшемся до 1941 г.

6. ОММЕТРЫ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ РЕГУЛЯТОРА „НУЛЯ"

Схема омметра, изображенная на фиг. 9, позволяет уменьшить зависимость результатов измерения от напряжения питания. Особенностью этой схемы является то, что реостат установки „нуля" $R_ш$ включен *параллельно* индикатору. Элементы этой схемы рассчитываются таким образом, чтобы при замкнутых зажимах *1* и *2* ($R_x=0$), минимально допустимом напряжении питания $U_{мин}$ и полностью введенном реостате ($R_ш=R_{ш\,макс}$) через индикатор проходил ток полного отклонения $I_п$. Если напряжение питания превышает минимально допустимое значение, то для установки стрелки на „нуль" сопротивление реостата $R_ш$ уменьшают, благодаря чему величина тока через индикатор уменьшается до $I_п$.



Фиг. 9. Схема омметра с параллельным включением регулятора „нуля".

Шунтирование индикатора сопротивлением $R_ш$ приводит к увеличению тока в цепи источника питания. При $R_x=0$ этот ток

$$I=I_п+\frac{I_п\,R_и}{R_ш}=I_п\left(1+\frac{R_и}{R_ш}\right),$$

где $\frac{I_п\,R_и}{R_ш}$ — ток, протекающий в цепи шунта.

При $R_x=0$ напряжение на зажимах источника питания равно сумме падений напряжений на добавочном сопротивлении $R_д$ и на индикаторе. Следовательно,

$$U=IR_д+I_пR_и=I_п\left(1+\frac{R_и}{R_ш}\right)R_д+I_пR_и. \qquad (8)$$

Отсюда находим зависимость необходимого сопротивления шунта $R_ш$ от напряжения питания U, которая определяется формулой

$$R_ш=\frac{I_п\cdot R_и\cdot R_д}{U-I_п\,(R_и+R_д)}. \qquad (9)$$

Чем больше напряжение питания, тем меньшая часть шунта должна быть включена. Минимально необходимое сопротивление шунта

$$R_{ш\ мин}=\frac{I_п R_и R_д}{U_{макс}-I_п(R_и+R_д)}. \qquad (9,a)$$

При уменьшении напряжения питания сопротивление шунта увеличивают. Полное сопротивление шунта выбирается, исходя из необходимости обеспечения установки „нуля" при минимально допустимом напряжении питания:

$$R_{ш\ макс}\geqslant\frac{I_п R_и R_д}{U_{мин}-I_п(R_и+R_д)}. \qquad (10)$$

Шунт может быть выполнен из двух частей: реостата с сопротивлением не менее $R_{ш\ макс}-R_{ш\ мич}$ и постоянного сопротивления, дополняющего общее сопротивление шунта до $R_{ш\ макс}$.

При выбранном сопротивлении $R_{ш\ макс}$ минимальное напряжение питания, при котором еще возможна работа омметра, определяется формулой

$$U'_{мин}=I_п\left(R_и+R_д+\frac{R_и R_д}{R_{ш\ макс}}\right). \qquad (11)$$

Рассмотрим зависимость дополнительной погрешности омметра от изменения напряжения источника питания.

Входное сопротивление омметра, работающего по схеме фиг. 9,

$$R_i=R_д+\frac{R_ш R_и}{R_ш+R_и}=R_д+\frac{R_и}{1+\frac{R_и}{R_ш}}.$$

Изменение сопротивления $R_ш$ в процессе установки „нуля" приводит к изменению входного сопротивления. Но при любом значении $R_ш$ входное сопротивление всегда будет больше $R_д$ и меньше $R_д+R_и$, т. е. максимально возможное изменение R_i не превышает величины $R_и$. Так как обычно величина добавочного сопротивления $R_д$ значительно больше $R_и$, то входное сопротивление омметра после установки „нуля" при изменившемся напряжении питания меняется мало и ошибка измерений, как это показано ниже, получается сравнительно небольшой.

Для более точной оценки величины дополнительной погрешности выясним зависимость входного сопротивления омметра от напряжения питания.

При любом напряжении питания входное сопротивление

$$R_i = \frac{U}{I}. \tag{12}$$

Подставляя значение I, полученное из первой части уравнения (8), находим:

$$R_i = \frac{UR_\partial}{U - I_n R_u} = \frac{R_\partial}{1 - \frac{I_n R_u}{U}}.$$

Очевидно, что при расчетном напряжении питания U_0

$$R_{i0} = \frac{R_\partial}{1 - \frac{I_n R_u}{U_0}}.$$

Отсюда получаем расчетную формулу для определения необходимой величины добавочного. сопротивления омметра при известном его входном сопротивлении

$$R_\partial = R_{i0}\left(1 - \frac{I_n R_u}{U_0}\right). \tag{13}$$

Дополнительная погрешность омметра, обусловленная изменением напряжения питания, для любой точки шкалы характеризуется коэффициентом

$$K_\partial = \frac{R_{i0} - R_i}{R_{i0}} = \frac{I_n R_u}{U - I_n R_u} \cdot \frac{U - U_0}{U_0} =$$

$$= -\frac{1}{\frac{U}{I_n R_u} - 1} \cdot \frac{U_0 - U}{U_0}.$$

Учитывая, что $\frac{U_0 - U}{U_0} = \varepsilon$, окончательно получаем:

$$K_\partial = \frac{-\varepsilon}{\frac{U}{I_n R_u} - 1}.$$

Из полученной формулы можно сделать следующие выводы:

1) Дополнительная погрешность омметра обратна по знаку изменению напряжения питания, вызвавшему ее при напряжении, меньшем расчетного, омметр дает завышенные показания, и наоборот.

2) Дополнительная погрешность тем меньше, чем больше абсолютная величина напряжения питания и чем меньшее напряжение $I_n R_u$ требует индикатор для полного отклонения его стрелки. Поэтому из двух индикаторов одинаковой чувствительности большую точность измерений позволяет получить индикатор с меньшим сопротивлением R_u.

При изменении напряжения питания в пределах $U_{макс} \div U_{мин}$ напряжению $U_{макс}$ соответствует наибольшая погрешность в сторону занижения показаний, а напряжению $U_{мин}$ — наибольшая погрешность в сторону завышения показаний. Если допускается, как это часто бывает, одинаковая степень изменения напряжения питания относительно расчетного значения как в сторону увеличения, так и уменьшения напряжения, то по абсолютной величине относительная дополнительная погрешность для напряжения $U_{мин}$ будет больше, чем для $U_{макс}$; она определяется формулой

$$|K_{д\,макс}| = \frac{\varepsilon_{макс}}{\frac{U_{мин}}{I_n R_u} - 1}, \qquad (14)$$

где

$$\varepsilon_{макс} = \frac{U_0 - U_{мин}}{U_0}.$$

Учитывая, что для большинства индикаторов $I_n R_u = 0{,}03 \div 0{,}25$ *в*, и считая, что в омметре для питания используется один сухой элемент с $U_{мин} = 1$ *в*, находим:

$$|K_{д\,макс}| = \frac{\varepsilon_{макс}}{3 \div 32}.$$

Таким образом, при параллельном включении регулятора „нуля“ в самом неблагоприятном лучае дополнительная погрешность омметра, связанная с изменением напряжения питания, оказывается от 3 до 32 раз меньшей, чем для схемы с последовательным включением регулятора „нуля“.

Обычно в батарейных омметрах допускается изменение напряжения питания в среднем на $\pm 20\%$ от расчетного. Поэтому при питании от одного элемента максимальная дополнительная погрешность в зависимости от данных

индикатора оказывается в пределах от 0,6 до 6,7%. Если источник питания состоит из нескольких элементов, погрешность соответственно уменьшается. Так, например, при увеличении минимально допустимого напряжения питания до $U_{мин}=2$ *в* дополнительная погрешность снижается до $0{,}3\div 2{,}9\%$.

Нормальная работа омметра обеспечивается правильным выбором напряжения питания.

При $U=U_{мин}$ реостат $R_ш$ включен полностью и в цепи питания при $R_x=0$ протекает ток $I_{мин}=I_n\left(1+\frac{R_u}{R_{ш\ макс}}\right)$. Поэтому

$$U_{мин}=I_{мин}\cdot R_i\approx I_n\left(1+\frac{R_u}{R_{ш\ макс}}\right)R_{i0}$$

(так как при малой допустимой погрешности $K_{д\ макс}$ можно считать $R_i\approx R_{i0}$).

Однако выбор напряжения питания более удобно производить, исходя не из значения $U_{мин}$, до которого может упасть напряжение при эксплуатации омметра, а из более определенной величины $U_{макс}$, зависящей от выбранного источника питания. Очевидно, что максимальное напряжение источника

$$U_{макс}=U_{мин}\cdot\frac{U_{макс}}{U_{мин}}\approx I_nR_{i0}\left(1+\frac{R_u}{R_{ш\ макс}}\right)\frac{U_{макс}}{U_{мин}}. \qquad (15)$$

Если допустимые изменения напряжения питания заданы (по абсолютной величине) как в сторону увеличения напряжения, так и в сторону его уменьшения одной и той же величиной $\varepsilon_{макс}$, то соотношение между напряжениями U_0, $U_{мин}$ и $U_{макс}$ выражается равенством

$$U_0=\frac{U_{мин}}{1-\varepsilon_{макс}}=\frac{U_{макс}}{1+\varepsilon_{макс}},$$

откуда

$$\frac{U_{макс}}{U_{мин}}=\frac{1+\varepsilon_{макс}}{1-\varepsilon_{макс}}. \qquad (16)$$

Следовательно, необходимое максимальное напряжение питания может быть также определено по формуле

$$U_{макс}\approx I_nR_{i0}\left(1+\frac{R_u}{R_{ш\ макс}}\right)\frac{1+\varepsilon_{макс}}{1-\varepsilon_{макс}}.$$

Полное сопротивление реостата $R_{ш\ макс}$ не следует брать слишком малым, так как это вызовет увеличение тока в цепи питания и необходимость повышения напряжения питания. В то же время и чрезмерно большая величина $R_{ш\ макс}$ нежелательна, так как она сделает регулировку „нуля" плавной лишь при малых напряжениях, близких к $U_{мин}$; при больших же напряжениях регулировка „нуля" станет недостаточно устойчивой вследствие того, что для регулировки будет использоваться лишь небольшой участок потенциометра. Практически выбирают $R_{ш\ макс} = (1,5 \div 10) R_и$. Поэтому при выборе напряжения питания можно пользоваться упрощенной расчетной формулой

$$U_{макс} = (1,1 \div 1,7) I_п R_{i0} \frac{U_{макс}}{U_{мин}} =$$

$$= (1,1 \div 1,7) I_п R_{i0} \frac{1 + \varepsilon_{макс}}{1 - \varepsilon_{макс}}. \qquad (17)$$

При заданной дополнительной погрешности измерений на выбор напряжения питания накладывается дополнительное ограничение, а именно:

$$U_{макс} \geqslant I_п R_и \left(1 + \frac{\varepsilon_{макс}}{K_{д\ макс}}\right) \frac{U_{макс}}{U_{мин}} =$$

$$= I_п R_и \left(1 + \frac{\varepsilon_{макс}}{K_{д\ макс}}\right) \frac{1 + \varepsilon_{макс}}{1 - \varepsilon_{макс}}. \qquad (18)$$

Данную формулу легко получить из формулы (14), решив ее относительно $U_{мин}$.

Величина $U_{макс}$ должна быть кратна максимальной э. д. с. одного элемента выбранного типа источника питания. Например, при использовании сухих элементов типа ФБС, имеющих максимальную э. д. с. порядка 1,5 *в* на один элемент, величина $U_{макс}$ может быть равна 1,5, 3,0, 4,5 *в* и т. д., т. е. должна быть кратна 1,5.

Рассмотренная схема применяется в омметрах многих фабричных комбинированных приборов (авометры типа ТТ-1 и М-493, вольтомметр типа М-491 и др.).

Пример 2. Рассчитать схему омметра с параллельным включением регулятора „нуля" по следующим исходным данным:

а) индикатор омметра — микроамперметр типа ИТ класса 2,5 — имеет данные: $I_п = 150$ *мка*, $R_и = 1\,500$ *ом*;

б) при $R_{x\,макс} = 100\,000$ *ом* допустимая основная относительная погрешность не должна превышать 15 % ($K_{макс} \leqslant 15\%$);

в) при изменении напряжения питания в пределах 20% от расчетного значения ($\varepsilon_{макс} = 0{,}2$) дополнительная погрешность измерений не должна превышать 2% ($K_{\partial\,макс} \leqslant 0{,}02$).

Расчет ведется в следующем порядке.

1. На графике фиг. 4 по кривой, соответствующей $K_u = 2{,}5\%$, находим, что при $K_{макс} = 15\%$

$$\frac{R_{x\,макс}}{R_{i0}} = 5; \quad \frac{R_{x\,мин}}{R_{i0}} = 0{,}25.$$

Отсюда выбираем расчетное входное сопротивление омметра

$$R_{i0} = \frac{R_{x\,макс}}{5} = \frac{100\,000}{5} = 20\,000 \text{ ом}$$

и определяем минимальную величину измеряемого сопротивления, соответствующую заданной точности измерений,

$$R_{x\,мин} = 0{,}25\,R_{i0} = 0{,}25 \cdot 20\,000 = 5\,000 \text{ ом}.$$

Таким образом, омметр может иметь рабочий предел измерений от 5 000 до 100 000 *ом*.

2. При $\varepsilon_{макс} = 0{,}2$ по формуле (16) отношение

$$\frac{U_{макс}}{U_{мин}} = \frac{1 + 0{,}2}{1 - 0{,}2} = 1{,}5.$$

3. Допустимое значение максимального напряжения питания определяется, с одной стороны, по формуле (17)

$$U_{макс} = (1{,}1 \div 1{,}7) \cdot 150 \cdot 10^{-6} \cdot 20\,000 \cdot 1{,}5 = 4{,}95 \div 7{,}65 \text{ в},$$

а с другой стороны, по формуле (18)

$$U_{макс} \geqslant 150 \cdot 10^{-6} \cdot 1\,500 \left(1 + \frac{0{,}2}{0{,}02}\right) 1{,}5 = 3{,}7 \text{ в}.$$

Выбираем в качестве источника питания четыре последовательно соединенных элемента типа ФБС; при этом

$$U_{макс} = 4 \cdot 1{,}5 = 6 \text{ в}.$$

4. Минимально допустимое напряжение питания

$$U_{мин} = \frac{6}{1{,}5} = 4 \text{ в}.$$

5. Расчетное напряжение питания считаем равным:

$$U_0 = \frac{6 + 4}{2} = 5 \text{ в}.$$

6. Добавочное сопротивление омметра определяем по формуле (13)

$$R_\partial = 20\,000 \left(1 - \frac{150 \cdot 10^{-6} \cdot 1\,500}{5}\right) = 19\,100 \text{ ом}.$$

7. Минимально необходимое сопротивление шунта определяем по формуле (9,а)

$$R_{ш\ мин} = \frac{150\cdot 10^{-6}\cdot 1\,500\cdot 19\,100}{6 - 150\cdot 10^{-6}(1\,500 + 19\,100)} = 1\,480\ ом.$$

8. Полное сопротивление шунта определяем по формуле (10)

$$R_{ш\ макс} \geqslant \frac{150\cdot 10^{-6}\cdot 1\,500\cdot 19\,100}{4 - 150\cdot 10^{-6}(1\,500 + 19\,100)} = 4\,720\ ом.$$

Выбираем $R_{ш\ макс} = 5\,000$ *ом*. При этом минимальное напряжение питания, при котором еще возможна работа омметра, уменьшается до величины, определяемой по формуле (11),

$$U'_{мин} = 150\cdot 10^{-6}\left(1\,500 + 19\,100 + \frac{1\,500\cdot 19\,100}{5\,000}\right) = 3{,}95\quad в.$$

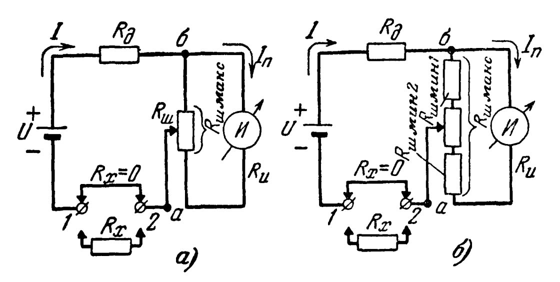
9. Градуировка шкалы омметра (в *ком*) определяется формулой (3), в которую вместо значения R_i следует подставить 20.

Градуировка может быть произведена для значений, лежащих примерно в пределах

$$\frac{R_i}{20} \div 20R_i = 1 \div 400\ ком.$$

7. ОММЕТРЫ С БАЛАНСНОЙ РЕГУЛИРОВКОЙ „НУЛЯ" (ТИП I)

Малую зависимость результатов измерения от напряжения питания можно получить в схемах омметров с балансной регулировкой „нуля". Подобные омметры встречаются двух типов. Схема омметра первого типа, примененная в авометре АВО-3, изображена на фиг. 10,*а*. В этой



Фиг. 10. Схемы омметров с балансной регулировкой „нуля" (тип I).

схеме установка „нуля" осуществляется посредством потенциометра, включенного параллельно индикатору и используемого в качестве *универсального шунта с плавной регулировкой*. В результате, входное сопротивление омметра становится более постоянным и мало зависит от изменения напряжения питания.

Предположим, что в процессе установки „нуля“ приходится уменьшать сопротивление шунтирующей части потенциометра $R_ш$. При этом одновременно будет увеличиваться сопротивление цепи индикатора, равное $R_{ш\ макс} - R_ш + R_u$, вследствие чего изменение общего сопротивления цепи индикатора и шунта $R_{аб}$, измеренного между точками *а* и *б*, в некоторых пределах изменения сопротивления $R_ш$ будет невелико, значительно меньше, чем в схеме омметра фиг. 9.

Если полное сопротивление потенциометра $R_{ш\ макс} > R_u$, то при уменьшении величины $R_ш$ вначале сопротивление $R_{аб}$ возрастает, а затем уменьшается. Поэтому элементы схемы можно выбрать таким образом, что как при максимальном, так и при минимальном напряжении питания омметр будет иметь одинаковое входное сопротивление. В этом случае возможная дополнительная погрешность, связанная с изменением напряжения питания, становится пренебрежимо малой, не превышающей, как это будет показано ниже, десятых долей процента.

При любом напряжении питания и $R_x = 0$ для схемы фиг. 10,*а* будет справедливо равенство

$$U = IR_i = \left[I_n + \frac{I_n (R_{ш\ макс} - R_ш + R_u)}{R_ш}\right] R_i = I_n \frac{R_{ш\ макс} + R_u}{R_ш} R_i$$

где $\frac{I_n (R_{ш\ макс} - R_ш + R_u)}{R_ш}$ — ток в цепи шунта при $R_x = 0$

Следовательно, зависимость величины сопротивления шунта от напряжения питания выражается формулой

$$R_ш = \frac{I_n R_i}{U} (R_{ш\ макс} + R_u). \qquad (19)$$

При максимальном напряжении питания $U_{макс}$ сопротивление шунтирующей части потенциометра наименьшее. В соответствии со схемой фиг. 10,*б* эта часть общего сопротивления $R_{ш\ макс}$ может быть выполнена в виде постоянного сопротивления

$$R_{ш\ мин1} = \frac{I_n R_i}{U_{макс}} (R_{ш\ макс} + R_u). \qquad (20)$$

При $U = U_{мин}$ сопротивление шунтирующей части потенциометра максимально и равно $\frac{I_n R_i}{U_{мин}} (R_{ш\ макс} + R_u)$.

Однако в общем случае полное сопротивление потенциометра может быть взято больше необходимого сопротивления шунта согласно условию

$$R_{ш\ макс} \geqslant \frac{I_n R_i}{U_{мин}} (R_{ш\ макс} + R_u).$$

Решая неравенство относительно $R_{ш\ макс}$, получаем общую формулу, определяющую выбор величины сопротивления потенциометра

$$R_{ш\ макс} \geqslant \frac{I_n R_i R_u}{U_{мин} - I_n R_i}. \qquad (21)$$

Чем больше напряжение питания, тем меньше необходимая величина $R_{ш\ макс}$.

Если сопротивление $R_{ш\ макс}$ больше его минимально необходимой величины, то последовательно с индикатором при $U = U_{мин}$ будет включена часть общего сопротивления. В соответствии со схемой фиг. 10,*б* она может быть выполнена в виде постоянного сопротивления

$$R_{ш\ мин 2} = R_{ш\ макс} - \frac{I_n R_i}{U_{мин}} (R_{ш\ макс} + R_u). \qquad (22)$$

Таким образом, полное сопротивление потенциометра принципиально может быть выполнено из трех частей: переменного сопротивления величиной не менее $R_{ш\ макс} - (R_{ш\ мин 1} + R_{ш\ мин 2})$ и двух постоянных сопротивлений, не превышающих по величине вычисленных значений $R_{ш\ мин 1}$ и $R_{ш\ мин 2}$. Уменьшение сопротивления регулируемой части потенциометра позволяет осуществить более плавную регулировку „нуля".

Из формулы (21) следует, что в общем случае напряжения питания омметра должны удовлетворять условиям

$$U_{мин} \geqslant I_n R_i \left(1 + \frac{R_u}{R_{ш\ макс}}\right)$$

и

$$U_{макс} = U_{мин} \frac{U_{макс}}{U_{мин}} \geqslant I_n R_i \left(1 + \frac{R_u}{R_{ш\ макс}}\right) \frac{U_{макс}}{U_{мин}}.$$

Зависимость входного сопротивления омметра от напряжения питания определяется изменением при установке „нуля“ сопротивления

$$R_{аб}=\frac{R_ш(P_{ш\,макс}-R_ш+R_u)}{R_{ш\,макс}+R_u}=R_ш\left(1-\frac{R_ш}{R_{ш\,макс}+R_u}\right)=$$

$$=\frac{I_nR_i}{U}(R_{ш\,макс}+R_u)\left(1-\frac{I_nR_i}{U}\right) \qquad (23)$$

(подставляя значение $R_ш$ из формулы (19).

Отсюда следует, что для того, чтобы входное сопротивление омметра было одинаково при напряжениях $U=U_{мин}$ и $U=U_{макс}$ (обычно это входное сопротивление принимается за расчетное), необходимо выполнить условие

$$\frac{I_nR_{i0}}{U_{мин}}(R_{ш\,макс}+R_u)\left(1-\frac{I_nR_{i0}}{U_{мин}}\right)=$$

$$=\frac{I_nR_{i0}}{U_{макс}}(R_{ш\,макс}+R_u)\left(1-\frac{I_nR_{i0}}{U_{макс}}\right).$$

Решая последнее равенство относительно $U_{макс}$, находим максимальное напряжение питания, соответствующее оптимальному режиму работы омметра:

$$U_{макс}=U_{опт}=I_nR_{i0}\left(1+\frac{U_{макс}}{U_{мин}}\right). \qquad (24)$$

Если выбранное напряжение $U_{макс}$ отличается от оптимального значения, то пределы изменения напряжения питания, на границах которого входное сопротивление будет одинаково, характеризуются отношением

$$\frac{U_{макс}}{U_{мин}}=\frac{U_{макс}}{I_nR_{i0}}-1. \qquad (25)$$

Если полученное отношение $\frac{U_{макс}}{U_{мин}}$ не меньше заданного, то его можно принять за расчетное. Тогда следует считать $U_{макс}=U_{опт}$, что позволит производить расчет омметра для оптимального режима его работы.

При расчете омметра обычно считают сопротивление $R_{ш\,мин}2=0$. Легко показать, что в этом случае при

оптимальном режиме работы расчет элементов цепи потенциометра можно производить по простым формулам:

$$R_{ш\ макс} = R_и \frac{U_{макс}}{U_{мин}};$$

$$R_{ш\ мин1} = R_и.$$

Определим для последнего случая, имеющего наиболее важное практическое значение, возможную величину дополнительной погрешности измерений.

Как было показано выше, сопротивление правой части схемы между точками *а* и *б* определяется формулой (23). При некотором промежуточном напряжении, близком по величине к $\frac{U_{макс}+U_{мин}}{2}$, сопротивление шунта $R_ш = \frac{R_{ш\ макс}+R_и}{2}$; при этом сопротивление между точками *а* и *б* достигает наибольшего значения

$$R_{аб\ макс} = \frac{R_{ш\ макс}+R_и}{4}.$$

При напряжении $U = U_{макс}$ сопротивление шунта $R_ш = R_{ш\ мин1} = R_и$; при этом сопротивление между точками *а* и *б* получает наименьшую величину

$$R_{аб\ мин} = \frac{R_{ш\ макс} \cdot R_и}{R_{ш\ макс}+R_и}.$$

Очевидно, что изменение сопротивления $R_{аб}$ вызывает соответствующее изменение входного сопротивления омметра. Считая, что градуировка омметра производится при $U = U_{макс}$, когда $R_{i0} = R_{i\ мин}$, находим:

$$R_{i\ макс} - R_{i0} = R_{аб\ макс} - R_{аб\ мин} = \frac{(R_{ш\ макс}-R_и)^2}{4(R_{ш\ макс}+R_и)}.$$

При $U = U_{макс}$ и $R_x = 0$ в цепи питания протекает ток

$$I_{макс} = I_п \frac{R_{ш\ макс}+R_и}{R_и}.$$

Поэтому расчетное входное сопротивление омметра

$$R_{i0} = \frac{U_{макс}}{I_{макс}} = \frac{U_{макс} \cdot R_и}{I_п(R_{ш\ макс}+R_и)}.$$

3*

По абсолютной величине максимально возможная относительная дополнительная погрешность омметра

$$|K_{д\,макс}| = \frac{R_{x\,макс} - R_{x0}}{R_{x0}} = \frac{R_{i\,макс} - R_{i0}}{R_{i0}} = \frac{I_n(R_{ш\,макс} - R_u)^2}{4U_{макс} \cdot R_u}.$$

Учитывая, что $R_{ш\,макс} = R_u \dfrac{U_{макс}}{U_{мин}}$, получаем:

$$K_{д\,макс} = \frac{\left(\dfrac{U_{макс}}{U_{мин}} - 1\right)^2}{4\dfrac{U_{макс}}{I_n R_u}}. \tag{26}$$

Если допустимые пределы изменения напряжения питания заданы коэффициентом

$$\varepsilon_{макс} = \frac{U_{макс} - U_{мин}}{U_{макс}},$$

то формула приобретает следующий вид:

$$K_{д\,макс} = \left(\frac{\varepsilon_{макс}}{1 - \varepsilon_{макс}}\right)^2 \cdot \frac{I_n R_u}{4U_{макс}}.$$

Из формулы (26) видно, что дополнительная погрешность, так же как и для схемы фиг. 9, будет тем меньше, чем больше напряжение питания и чем меньше падение напряжения на индикаторе. Однако с точки зрения величины этой погрешности балансная схема может дать значительно лучшие результаты, чем схема омметра с параллельным включением регулятора „нуля“.

Как ранее указывалось, для большинства индикаторов $I_n R_u = 0{,}03 \div 0{,}25$ *в*. Считая $U_{макс} = 1{,}5$ *в* (в качестве источника питания взят один элемент), $\dfrac{U_{макс}}{U_{мин}} = 1{,}5$ (что соответствует $\varepsilon_{макс} = 0{,}33$ *), получаем:

$$K_{д\,макс} = 0{,}00125 \div 0{,}0104,$$

т. е. дополнительная погрешность при использовании в качестве источника питания одного элемента лежит

* Учитывая, что напряжение питания в рассматриваемой схеме может отличаться от расчетного максимального напряжения лишь в сторону уменьшения, коэффициент $\varepsilon_{макс}$ следует выбирать по абсолютной величине бо́льшим, чем в случае схем омметров фиг. 8 и 9.

в пределах $0,12 \div 1\%$. При увеличении числа элементов величина дополнительной погрешности становится еще меньшей. Таким образом, при одних и тех же условиях работы рассмотренная балансная схема позволяет получить примерно в 6 раз меньшую дополнительную погрешность, чем схема омметра с параллельным включением регулятора „нуля".

По точности измерений балансная схема приближается к схемам с магнитным шунтом и ее следует считать наиболее целесообразной для использования в омметрах комбинированных приборов.

При расчете омметра по схеме фиг. 10 коэффициентом $K_{\partial\,макс}$ можно не задаваться, учитывая его малую величину по сравнению с относительной основной погрешностью омметра.

Необходимая величина добавочного сопротивления омметра при $U_0 = U_{макс}$ определяется следующей очевидной формулой:

$$R_\partial = R_{i0} - R_{аб\,мин} = R_{i0} - R_{ш\,мин\,1}\left(1 - \frac{R_{ш\,мин\,1}}{R_{ш\,макс} + R_и}\right). \quad (27)$$

При работе в оптимальном режиме и $R_{ш\,мин\,2} = 0$ формула получает следующий вид:

$$R_\partial = R_{i0} - \frac{R_{ш\,макс} \cdot R_и}{R_{ш\,макс} + R_и}. \quad (28)$$

Пример 3. Рассчитать схему омметра фиг. 10, *б* по следующим исходным данным:

а) индикатор омметра — миллиамперметр типа М-41 класса 2,5 — имеет данные: $I_п = 5$ *ма*, $R_и = 15$ *ом*;

б) расчетное входное сопротивление $R_{i0} = 100$ *ом*, пределы измерения ограничиваются допустимой основной погрешностью $K_{макс} = 20\%$;

в) допустимые изменения напряжения питания характеризуются отношением $\frac{U_{макс}}{U_{мин}} = 1,5$.

Расчет ведется в следующем порядке.

1. На графике фиг. 4 по кривой, соответствующей $K_и = 2,5\%$, находим, что при $K_{макс} = 20\%$

$$\frac{R_{x\,мин}}{R_{i0}} \approx 0,16; \quad \frac{R_{x\,макс}}{R_{i0}} \approx 7.$$

Отсюда следует, что рабочий предел измерений омметра ограничивается величинами

$$R_{x\,мин} \approx 0,16R_{i0} = 0,16 \cdot 100 = 16 \text{ ом};$$

$$R_{x\,макс} \approx 7R_{i0} = 7 \cdot 100 = 700 \text{ ом}.$$

2. Оптимальное напряжение питания находим по формуле (24):

$$U_{макс} = U_{опт} = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 100\ (1 + 1{,}5) = 1{,}25\ в.$$

Выбираем в качестве источника питания один элемент типа ФБС, обеспечивающий $U_{макс} = 1{,}5\ в$.

3. Из условия (25) для получения одинакового входного сопротивления при наибольшем и наименьшем напряжении питания определяем:

$$\frac{U_{макс}}{U_{мин}} = \frac{1{,}5}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 100} - 1 = 2.$$

Это отношение в дальнейшем принимаем за расчетное.

4. Минимально допустимое напряжение питания

$$U_{мин} = \frac{U_{макс}}{2} = \frac{1{,}5}{2} = 0{,}75\ в.$$

5. Полное сопротивление шунта определяем из условия (21):

$$R_{ш\ макс} \geqslant \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 15}{0{,}75 - 5 \cdot 10^{-3} \cdot 100} = 30\ ом.$$

Выбираем $R_{ш\ макс} = 30\ ом$. В этом случае $R_{ш\ мин2} = 0$; $R_{ш\ мин1} = R_и = 15\ ом$. Отсюда следует, что сопротивление переменной части шунта должно быть не менее 15 *ом* и не более 30 *ом*.

6. Максимально возможная относительная дополнительная погрешность измерений определяется по формуле (26):

$$K_{д\,макс} = \frac{(2-1)^2}{4\,\frac{1{,}5}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 15}} = 0{,}0125,$$

т. е. 1,25%.

7. Добавочное сопротивление определяем по формуле (28):

$$R_д = 100 - \frac{30 \cdot 15}{30 + 15} = 90\ ом.$$

8. Градуировка шкалы омметра (в омах) определяется формулой (3). Градуировка производится для значений, лежащих примерно в пределах

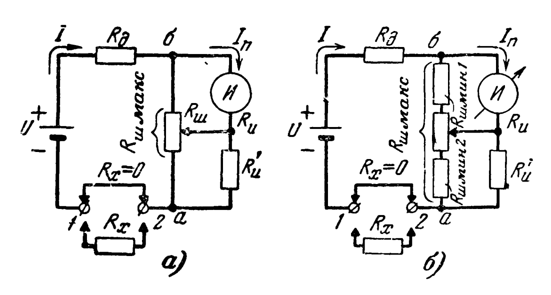
$$\frac{R_{i0}}{20} \div 20R_{i0} = 5 \div 2\,000\ ом.$$

8. ОММЕТРЫ С БАЛАНСНОЙ РЕГУЛИРОВКОЙ „НУЛЯ" (ТИП II)

Малая зависимость результатов измерения от напряжения питания может быть получена при работе омметра по балансной схеме второго типа, приведенной на фиг. 11, *а* и примененной в авометре АВО-5. Схема содержит два последовательно включенных регулируемых плеча. В одно плечо входит индикатор, зашунтированный сопротивлением

$R_ш$, которое представляет собой часть полного сопротивления шунта $R_{ш\,макс}$. Второе плечо составляют сопротивление $R'_и$, равное по величине сопротивлению индикатора, и включенное параллельно ему сопротивление оставшейся части шунта $(R_{ш\,макс} - R_ш)$.

Установку „нуля" при изменении напряжения питания производят с помощью переменного сопротивления шунта. При этом входное сопротивление омметра будет изменяться незначительно, так как возрастание сопротивления



Фиг. 11. Схемы омметров с балансной регулировкой „нуля" (тип II).

одного из плеч компенсируется уменьшением сопротивления другого плеча, и наоборот.

При любом напряжении питания и $R_x = 0$ для схемы омметра фиг. 11,*а* будет справедливо равенство

$$U = IR_i = I_n\left(1 + \frac{R_u}{R_ш}\right)R_i\,. \tag{29}$$

Отсюда находим зависимость сопротивления $R_ш$ от напряжения источника питания:

$$R_ш = \frac{I_n R_i R_u}{U - I_n R_i}\,. \tag{30}$$

При $U = U_{макс}$ величина сопротивления $R_ш$ наименьшая. В соответствии со схемой фиг. 11,*б* эта часть общего сопротивления $R_{ш\,макс}$ может быть выполнена в виде постоянного сопротивления

$$R_{ш\,мин1} = \frac{I_n R_i R_u}{U_{макс} - I_n R_i}\,. \tag{31}$$

Необходимая величина полного сопротивления шунта, обеспечивающая возможность установки „нуля“ при минимальном напряжении $U_{мин}$, определяется формулой

$$R_{ш\ макс} \geqslant \frac{I_n R_i R_u}{U_{мин} - I_n R_i}. \tag{32}$$

Однако, если полное сопротивление шунта принять равным правой части формулы, то при $U = U_{мин}$ сопротивление R_u' окажется закороченным. При этом входное сопротивление омметра будет заметно изменяться с изменением питающего напряжения. Поэтому следует брать $R_{ш\ макс}$ бо́льшим его минимально необходимого значения. Тогда при $U = U_{мин}$ параллельно сопротивлению R_u' будет включена часть общего сопротивления шунта. Так же как и в случае схемы фиг. 10, *б*, эта часть сопротивления может быть выполнена в виде постоянного сопротивления

$$R_{ш\ мин2} = R_{ш\ макс} - \frac{I_n R_i R_u}{U_{мин} - I_n R_i}. \tag{33}$$

В оптимальном режиме работы при напряжениях $U_{макс}$ и $U_{мин}$ омметр должен иметь одинаковое входное сопротивление (обычно принимаемое за расчетное сопротивление R_{i0}). Очевидно, что это будет иметь место лишь в том случае, если $R_{ш\ мин1} = R_{ш\ мин2}$. Подставляя сюда значения $R_{ш\ мин1}$ и $R_{ш\ мин2}$ из уравнений (31) и (33), находим оптимальную величину полного сопротивления шунта

$$R_{ш\ макс} = R_{ш\ опт} = \frac{I_n R_{i0} R_u}{U_{мин} - I_n R_{i0}} + \frac{I_n R_{i0} R_u}{U_{макс} - I_n R_{i0}}. \tag{34}$$

Величина добавочного сопротивления омметра определяется по формуле

$$R_д = R_{i0} - R_{аб\ мин} = R_{i0} - \left[\frac{R_{ш\ мин1} R_u}{R_{ш\ мин1} + R_u} + \right.$$

$$\left. + \frac{(R_{ш\ макс} - R_{ш\ мин1}) R_u}{R_{ш\ макс} - R_{\cdot\ мин1} + R_u}\right], \tag{35}$$

где $R_{аб\ мин}$ — сопротивление правой части схемы между точками *а* и *б* при максимальном напряжении питания $U_{макс}$, принимаемом за расчетное.

В оптимальном режиме работы при напряжениях $U_{макс}$ и $U_{мин}$ омметр имеет наименьшее входное сопротивление. Наибольшее входное сопротивление будет иметь место при некотором промежуточном напряжении, которому соответствует сопротивление $R_ш = \frac{R_{ш\ макс}}{2}$. Путем исследования, аналогичного проведенному в § 7, можно показать, что максимальная величина относительной дополнительной погрешности, вызываемой изменением напряжения питания, выражается формулой

$$K_{д\ макс} = \frac{\left(\frac{U_{макс}}{U_{мин}} - 1\right)^2}{\frac{U_{макс}}{I_n R_u}} \cdot \frac{1}{\frac{2U_{макс}}{I_n R_{i0}} - \left(\frac{U_{макс}}{U_{мин}} + 1\right)}, \qquad (36)$$

где

$$\frac{2U_{макс}}{I_n R_{i0}} - \left(\frac{U_{макс}}{U_{мин}} + 1\right) > 0.$$

Исходя из данной формулы, можно составить квадратное уравнение:

$$U^2_{макс} - \frac{I_n R_{i0}}{2}\left(\frac{U_{макс}}{U_{мин}} + 1\right) U_{макс} - \frac{I_n^2 R_u R_{i0}}{2K_{д\ макс}} \times$$

$$\times \left(\frac{U_{макс}}{U_{мин}} - 1\right)^2 = 0, \qquad (37)$$

решая которое относительно $U_{макс}$, находим максимальное напряжение питания, обеспечивающее заданную точность измерений.

Сравнение полученной формулы для $K_{д\ макс}$ с аналогичной формулой (26) показывает, что для получения одинаковой для обеих схем фиг. 11 и 10 дополнительной погрешности необходимо, чтобы для схемы омметра фиг. 11 выполнялось условие

$$\frac{2U_{макс}}{I_n R_{i0}} - \left(\frac{U_{макс}}{U_{мин}} + 1\right) = 4$$

или

$$U_{макс} = I_n R_{i0}\left(2{,}5 + 0{,}5\frac{U_{макс}}{U_{мин}}\right) > 3 I_n R_{i0}. \qquad (38)$$

Для схемы омметра фиг. 10 оптимальное напряжение питания, как было доказано, выражается формулой (24), из которой видно, что $U_{макс} = U_{опт} > 2I_n R_{i0}$. Следовательно, для получения одинаковых качественных показателей балансная схема омметра фиг. 11 требует значительно большего напряжения питания, чем балансная схема омметра фиг. 10, или, иными словами, при одинаковых напряжениях питания и входных сопротивлениях схема фиг. 10 обеспечивает бо̀льшую точность измерения, чем схема фиг. 11.

В том случае, если допустимая величина дополнительной погрешности омметра не задана, то максимальное напряжение питания по аналогии со схемой омметра фиг. 9 определяется формулой (17). При выборе величины $U_{макс}$ в соответствии с данной формулой сопротивление $R_{ш\ макс}$ будет находиться в пределах $(1{,}5 \div 10) R_u$, что обеспечит достаточно плавную установку „нуля" омметра при изменении напряжения питания в широких пределах.

Пример 4. Рассчитать омметр по схеме фиг. 11,*б* с пределом измерений $R_{x\ мин} \div R_{x\ макс} = 20 \div 500$ *ком*. Выбрать индикатор омметра, исходя из допустимого значения основной относительной погрешности $K_{макс} = 10\%$. При изменении напряжения питания, характеризуемом отношением $\frac{U_{макс}}{U_{мин}} = 1{,}3$, дополнительная погрешность измерений не должна превышать 1% (т. е. $K_{д\ макс} \leqslant 0{,}01$).

Расчет ведется в следующем порядке:

1. Пользуясь формулой (4), выбираем входное сопротивление омметра

$$R_{i0} = \sqrt{20 \cdot 500} = 100\ ком.$$

2. По графику фиг. 4 находим, что в пределах $\frac{R_{x\ мин}}{R_{i0}} \div \frac{R_{x макс}}{R_{i0}} = 0{,}2 \div 5$ основная относительная погрешность омметра не будет превышать 10% при работе с индикатором, основная относительная погрешность которого не выше 1,5%. Поэтому выбираем в качестве индикатора микроамперметр типа М-495 класса 1,5, имеющий следующие данные: $I_n = 50$ *мка*; $R_u = 2\,600$ *ом*.

3. Для определения максимального напряжения питания, при котором $K_{д\ макс} = 0{,}01$, составляем квадратное уравнение в соответствии с уравнением (37):

$$U^2_{макс} - \frac{50 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^3}{2}(1{,}3 + 1) U_{макс} -$$

$$- \frac{(50 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 2\,600 \cdot 100 \cdot 10^3}{2 \cdot 0{,}01}(1{,}3 - 1)^2 = 0.$$

Положительный корень уравнения дает $U_{макс} = 6{,}2$ *в*.

Из формулы (17) находим:

$$U_{макс} = (1{,}1 \div 1{,}7)\, 50 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{3} \cdot 1{,}3 = (7{,}15 \div 11) \text{ в}.$$

Выбираем в качестве источника питания пять последовательно соединенных элементов типа ФБС, обеспечивающих напряжение

$$U_{макс} = 5 \cdot 1{,}5 = 7{,}5 \text{ в}.$$

Проверка по формуле (36) показывает, что при выбранном напряжении $U_{макс}$ дополнительная погрешность омметра становится пренебрежимо малой, не превышая 0,23%.

4. Минимально допустимое напряжение питания

$$U_{мин} = \frac{U_{макс}}{1{,}3} = \frac{7{,}5}{1{,}3} = 5{,}77 \text{ в}.$$

5. Полное сопротивление шунта должно удовлетворять уравнению (32):

$$R_{ш\ макс} \geqslant \frac{50 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{3} \cdot 2\,600}{5{,}77 - 50 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{3}} = 16\,900 \text{ ом}.$$

Оптимальное сопротивление шунта определяем по формуле (34):

$$R_{ш\ опт} = \frac{50 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{3} \cdot 2\,600}{5{,}77 - 50 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{3}} +$$

$$+ \frac{50 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{3} \cdot 2\,600}{7{,}5 - 50 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{3}} = 22\,100 \text{ ом}.$$

Выбираем $R_{ш} = R_{ш\ опт} = 22\,100$ *ом*.

6. Допустимые значения сопротивлений нерегулируемых частей находим по формуле (31):

$$R_{ш\ мин1} = R_{ш\ мин2} = \frac{50 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{3} \cdot 2\,600}{7{,}5 - 50 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{3}} = 5\,200 \text{ ом}.$$

Следовательно, сопротивление переменной части шунта должно быть не менее $R_{ш\ макс} - (R_{ш\ мин1} + R_{ш\ мин2}) = 11\,700$ *ом*. Предположим, что у нас имеется переменное сопротивление 15 000 *ом*. Тогда постоянные сопротивления могут быть взяты, например, равными 4 000 и 3 100 *ом*.

7. Добавочное сопротивление омметра определяем по формуле (35):

$$R_{д} = 100 \cdot 10^{3} - \left[\frac{5\,200 \cdot 2\,600}{5\,200 + 2\,600} + \frac{(22\,100 - 5\,200)\, 2\,600}{22\,100 - 5\,200 + 2\,600}\right] = 96\,000 \text{ ом}.$$

8. Градуировка омметра (в килоомах) определяется формулой (3).

Градуировка производится для значений, лежащих примерно в пределах

$$\frac{R_i}{50} \div 50R_i = 2 \text{ ком} \div 5 \text{ мгом}.$$

Глава четвертая

МНОГОПРЕДЕЛЬНЫЕ БАТАРЕЙНЫЕ ОММЕТРЫ

9. РАСШИРЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕРЕНИЙ ОММЕТРОВ

Неравномерный характер шкалы омметров ограничивает пределы измерения сопротивлений лишь центральной частью шкалы, где основная погрешность сравнительно невелика. Поэтому, несмотря на то, что шкала омметра может иметь градуировку (не считая отметок 0 и ∞) для весьма широкого диапазона сопротивлений, примерно от $\frac{R_i}{100}$ до $100R_i$, практический предел измерений оказывается значительно у́же.

Границы рабочего участка шкалы, которые приближенно можно считать симметрично расположенными относительно ее середины, характеризуются максимально и минимально допустимыми для измерения данным прибором значениями сопротивлений $R_{x\,макс}$ и $R_{x\,мин}$, которые определяются допустимой основной погрешностью измерений и классом точности индикатора в соответствии с графиком фиг. 4. Так, например, при использовании индикатора класса 1,0 допустимой основной погрешности $K_{макс}=5\%$ будет соответствовать рабочий участок от $0{,}37R_i$ до $2{,}9R_i$ при отношении $\frac{R_{x\,макс}}{R_{x\,мин}}\approx 8$; при $K_{макс}=10\%$ границы этого участка расширяются до значений $0{,}12R_i \div 9R_i$ при отношении $\frac{R_{x\,макс}}{R_{x\,мин}}\approx 75$. Если же применить индикатор класса 1,5, то при $K_{макс}=10\%$ границы рабочего участка будут $0{,}21R_i \div 5{,}2R_i$ при уменьшении отношения $\frac{R_{x\,макс}}{R_{x\,мин}}\approx 25$.

Отсюда следует, что для уменьшения погрешности измерений желательны применение в омметре индикатора повышенной точности и сокращение рабочего участка шкалы.

В практике часто возникает необходимость измерения сопротивлений в значительно более широком диапазоне, чем это может обеспечить один предел измерений омметра при заданной точности измерений. Задача расширения пределов измерения разрешается путем применения многопредельных омметров.

Предположим, что при данном входном сопротивлении омметра R_i и измеряемом сопротивлении R_x стрелка индикатора отклоняется на угол, определяемый уравнением (3). Очевидно, что если увеличить в любое число раз N входное сопротивление омметра R_i, то такое же отклонение стрелки будет соответствовать в N раз большей величине измеряемого сопротивления. В последнем случае для измерения может быть использована шкала омметра, проградуированная для входного сопротивления R_i, отсчет по которой надо будет умножать на выбранный множитель N. Рассуждая аналогичным образом, можно доказать, что уменьшение входного сопротивления приводит к пропорциональному уменьшению измеряемых омметром величин R_x. Во всех этих случаях перед началом измерений необходимо производить установку „нуля".

Отсюда следует, что для изменения пределов измерений сопротивлений необходимо изменять входное сопротивление омметра. На этом принципе основана работа многопредельных омметров.

Обозначим через

$$N = \frac{R'_{x\,макс}}{R'_{x\,мин}}$$

коэффициент перекрытия шкалы, характеризующий соотношение между максимальным и минимальным значениями R_x, соответствующими границам рабочего участка шкалы одного предела измерений омметра. При использовании индикаторов класса 1,0, 1,5 и 2,5 величина этого коэффициента обычно лежит в пределах $10 \div 100$.

Значение этого коэффициента в каждом конкретном случае можно определить, пользуясь графиком фиг. 4. Так, для рассмотренных выше примеров при $K_u = 1\%$ и $K_{макс} = 5\%$ $N = 8$; при $K_u = 1\%$ и $K_{макс} = 10\%$ $N = 75$; при $K_u = 1{,}5\%$ и $K_{макс} = 10\%$ $N = 25$.

Учитывая, что входное сопротивление омметра для каждого предела измерений $R'_i \approx \sqrt{R'_{x\,мин} \cdot R'_{x\,макс}}$, можно показать, что границы рабочего участка шкалы определяются значениями

$$R'_{x\,мин} \div R'_{x\,макс} = \frac{R'_i}{\sqrt{N}} \div \sqrt{N} R'_i. \qquad (39)$$

Омметр может быть однопредельным лишь в том случае, если заданный предел измерений соответствует отношению $\frac{R_{x\,макс}}{R_{x\,мин}} \leqslant N$. Если же $\frac{R_{x\,макс}}{R_{x\,мин}} > N$, то омметр должен содержать несколько пределов измерений.

Число необходимых пределов измерений определяется из соотношения $\frac{R_{x\,макс}}{R_{x\,мин}} \approx N^p$, откуда

$$p \approx \frac{1}{\lg N} \cdot \lg \frac{R_{x\,макс}}{R_{x\,мин}}, \qquad (40)$$

где p округляется до ближайшего целого числа.

Так, например, при заданном диапазоне $10 \div 500\,000$ *ом* и $N = 10$

$$p \approx \lg 50\,000 = 4{,}7,$$

и, следовательно, омметр должен иметь пять пределов измерений.

Как было указано выше, в многопредельных омметрах переход с одного предела измерений на другой осуществляют изменением в определенное число раз входного сопротивления R_i. Для обеспечения непрерывного перекрытия всего диапазона измеряемых сопротивлений при заданной точности измерения необходимо, чтобы входное сопротивление омметра изменялось от одного предела измерений к другому в N раз, где N — коэффициент перекрытия шкалы.

Если коэффициент N не кратен 10, то затрудняется использование одной и той же градуировки шкалы для отсчета при различных пределах измерений, что приводит к необходимости нанесения нескольких градуировок на шкалу (это сделано, например, в двухпредельном омметре типа МОП, имеющем $N = 5$). Поэтому обычно значение коэффициента N округляют до 10 или 100, что позволяет пользоваться одной и той же градуировкой на всех пределах измерений. Эту градуировку обычно выполняют для предела измерений с наименьшим входным сопротивлением, а при других пределах измерений отсчет по шкале умножают на соответствующий множитель.

При $N = 10$ измерение любого сопротивления может быть произведено на узком центральном участке шкалы, в границах которого $\frac{R_i}{\sqrt{10}} \div \sqrt{10} R_i$ основная погрешность

при индикаторе класса 1,0 не превышает 5,5%. При $N = 100$ границы этого участка расширяются до значений $\frac{R_i}{10} \div 10R_i$, а возможная величина основной погрешности при том же классе индикатора возрастает до 12,1%. Следовательно, с точки зрения точности измерения желательно брать коэффициент N возможно меньшей величины. Однако следует учитывать, что при этом увеличивается число пределов измерений, необходимых для перекрытия заданного диапазона измеряемых сопротивлений, что усложняет конструкцию омметра.

При выбранном коэффициенте N входное сопротивление первого (наивысшего) предела измерений омметра выбирается по формуле

$$R_{i1} \approx \frac{R_{x\,макс}}{\sqrt{N}}, \tag{41}$$

после чего легко определяются входные сопротивления для всех остальных пределов измерений. Например, для пятипредельного омметра, работающего в диапазоне $10 \div 500\,000$ *ом* при $N = 10$, $R_{i1} \approx \frac{500\,000}{\sqrt{10}} = 158\,000$ *ом*. Выбираем $R_{i1} = 150$ *ком*. Тогда $R_{i2} = \frac{R_{i1}'}{N} = 15$ *ком*, $R_{i3} = 1\,500$ *ом*, $R_{i4} = 150$ *ом* и $R_{i5} = 15$ *ом*.

Измерение сопротивлений следует производить при том пределе измерения, при котором отсчет R_x получается возможно ближе к центру шкалы.

10. ОСНОВЫ РАСЧЕТА МНОГОПРЕДЕЛЬНЫХ ОММЕТРОВ

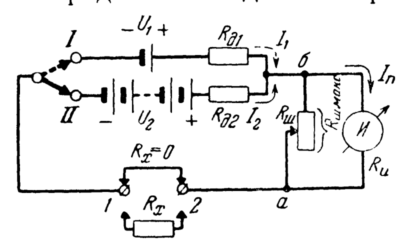
За исходную схему при расчете многопредельного омметра выбирают одну из схем фиг. 9, 10 или 11. Высокая точность измерений при возможных изменениях напряжения источника питания может быть получена при работе омметра по балансной схеме фиг. 10. Несколько худшие результаты дает балансная схема омметра фиг. 11. Достаточную для практических целей точность измерений обеспечивает и схема омметра фиг. 9.

Расчетное входное сопротивление любой последовательной схемы омметра целиком определяется расчетным напряжением U и величиной соответствующего ему тока I в цепи питания при короткозамкнутых входных зажимах

согласно формуле (12). Очевидно, что изменение входного сопротивления, необходимое для перехода на другой предел измерений, должно обязательно сопровождаться изменением напряжения U или тока I в цепи питания, или одновременным изменением и напряжения и тока. Однако при всех этих изменениях необходимо, чтобы ток, протекающий через индикатор при $R_x = 0$, равнялся току полного отклонения I_n.

Расширение пределов измерения батарейных омметров в сторону бóльших сопротивлений производится по схеме фиг. 12.

Предположим, что при переходе с предела измерения I на предел II входное сопротивление увеличивается в N раз (т. е. $R_{i2} = NR_{i1}$), что достигается соответствующим выбором добавочного сопротивления $R_{д2}$. Одновременно в N раз увеличивают напряжение питания (т. е. $U_2 = NU_1$). В результате ток в цепи питания при $R_x = 0$ останется без изменения ($I_2 = I_1$), так же как и ток I_n через индикатор.



Фиг. 12. Расширение предела измерений омметра в сторону больших сопротивлений.

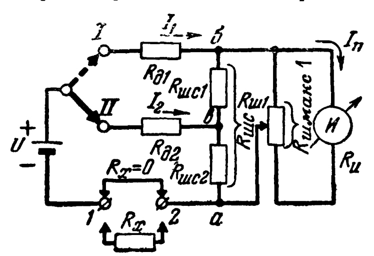
Таким образом, увеличение входного сопротивления должно обязательно сопровождаться пропорциональным ему увеличением напряжения питания. В этом случае расчет омметра весьма прост и заключается лишь в определении нужных величин добавочных сопротивлений для каждого предела измерений, которые выбираются из условия получения определенного входного сопротивления.

Схема фиг. 12 принципиально может быть использована и для изменения предела измерений в сторону малых сопротивлений. Однако в этом случае ее применение ограничивается величиной сопротивления цепи индикатора, которое всегда должно быть меньше заданного входного сопротивления, и тем, может ли быть соответствующим образом уменьшено напряжение источника питания.

Предположим, что при переходе от предела измерений I к пределу II входное сопротивление уменьшают в 10 раз путем соответствующего выбора добавочного сопротивления. Для обеспечения нормальной работы омметра необходимо также уменьшить в 10 раз напряжение питания,

что может быть осуществлено лишь тогда, когда число элементов батареи питания не менее 10 и кратно 10. Если же источник питания состоит, например, из одного элемента, то уменьшение напряжения питания без применения делителей напряжения вообще невозможно.

Расширение пределов измерений в сторону меньших сопротивлений может быть осуществлено без изменения напряжения питания, если омметр собран по схеме фиг. 13 В этом случае с уменьшением входного сопротивления обратно пропорционально ему будет увеличиваться ток в цепи питания. Чтобы это не привело к изменению тока в цепи индикатора, который должен быть равен I_n, необходимо соответствующим образом изменить степень шунтирования индикатора. Для этого шунт к индикатору делают из двух ветвей. переменного сопротивления $R_{ш\, макс1}$, служащего для установки „нуля“, и параллельно подключенной к нему системы последовательно соединенных сопротивлений, представляющей собой ступенчатый шунт $R_{шс}$. Необходимая степень шунтирования обеспечивается соответствующим расчетом сопротивлений отдельных участков шунта.



Фиг. 13. Расширение предела измерений омметра в сторону малых сопротивлений.

Предположим, что в схеме двухпредельного омметра фиг. 13 при неизменном напряжении питания U производится переход от предела измерений I к пределу II, которому соответствует входное сопротивление $R_{i2} = \frac{R_{i1}}{N}$. Очевидно, что при пределе измерений II ток в цепи питания возрастет в N раз ($I_2 = NI_1$), и для того чтобы обеспечить постоянство тока в цепи индикатора, необходимо цепь питания подключить к участку шунта сопротивлением $R_{шс2} = \frac{R_{шс}}{N}$. Так, например, при $N = 10$ ток в цепи питания $I_2 = 10I_1$, а сопротивление шунта $R_{шс2} = \frac{R_{шс}}{10}$. При этом $0{,}9I_2$ будет ответвляться через $R_{шс2}$, а $0{,}1I_2 = I_1$ пойдет через $R_{шс1}$, чем и будет обеспечено протекание через индикатор тока I_n. Величина добавочного сопротив-

ления $R_{\partial 2}$ рассчитывается так, чтобы дополнить общее сопротивление цепи индикатора и шунта $R_{ав}$, измеренное между точками *а* и *в*, до заданного значения R_{i2}, т. е. $R_{\partial 2} = R_{i2} - R_{ав}$.

В некоторых случаях, уменьшая входное сопротивление омметра в N раз, изменяют одновременно в цепи питания ток и напряжение. Если при этом напряжение уменьшают в H раз (причем $H < N$), то величина тока увеличивается в T раз, так как должно соблюдаться равенство $N = HT$. Из этого равенства следует, что

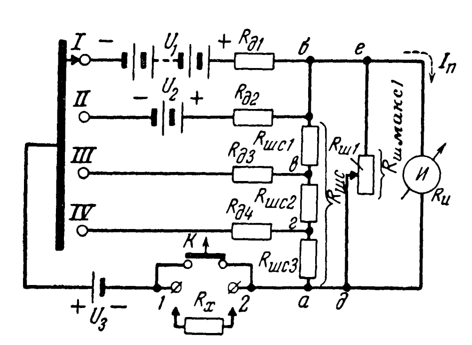
$$T = \frac{N}{H}. \qquad (42)$$

Так, например, если входное сопротивление уменьшают в 10 раз, причем напряжение питания уменьшают только в 2 раза, то ток в цепи питания возрастает в 5 раз.

Очевидно, что в общем случае

$$R_{шс2} = \frac{R_{шс}}{T}. \qquad (43)$$

Расчет схемы многопредельного омметра следует начинать с наивысшего предела измерений, которому соответствуют наибольшее входное сопротивление R_{i1} и наибольшее напряжение питания. При переходе к другим пределам измерений вначале уменьшают до возможного минимума напряжение питания, а затем увеличивают степень шунтирования индикатора с целью компенсации возрастания тока в цепи питания.



Фиг. 14. Типовая схема многопредельного батарейного омметра.

Типовая схема многопредельного батарейного омметра в общем случае имеет вид, представленный на фиг. 14.

При пределе измерений *I*, соответствующем наибольшему входному сопротивлению R_{i1}, напряжение питания омметра наибольшее и равно $U_1 + U_3$. Переход к пределу измерений *II*, характеризуемому входным сопротивлением

$R_{i2} = \frac{R_{i1}}{N}$, сопровождается уменьшением в N раз напряжения питания до величины $U_2 + U_3 = \frac{U_1 + U_3}{N}$. При пределе измерений III входное сопротивление $R_{i3} = \frac{R_{i2}}{N} = \frac{R_{i1}}{N^2}$. Переход к этому пределу измерений сопровождается как уменьшением напряжения питания в H раз до напряжения U_3, обеспечиваемого одним элементом, так и увеличением тока в цепи питания в $T = \frac{N}{H}$ раз. При этом сопротивление участка шунта

$$R_{шс2} + R_{шс3} = \frac{R_{шс}}{T}. \quad (44)$$

Переход к пределу измерений IV, для которого $R_{i4} = \frac{R_{i3}}{N} = \frac{R_{i1}}{N^3}$, производится при неизменном напряжении питания, равном U_3, что приводит к дальнейшему увеличению тока в цепи питания в N раз. Поэтому сопротивление участка шунта

$$R_{шс3} = \frac{R_{шс2} + R_{шс3}}{N} = \frac{R_{шс}}{NT}. \quad (45)$$

В качестве примера с необходимыми численными значениями читатель может самостоятельно рассмотреть схему многопредельного омметра из широко распространенного авометра типа ТТ-1, приведенную на фиг. 15. Омметр работает по последовательной схеме с параллельным включением регулятора „нуля". Он имеет четыре предела измерений, которым соответствуют входные сопротивления 20 000, 2 000, 200 и 20 *ом*. При первом пределе измерений питание омметра производится от четырех последовательно соединенных элементов типа ФБС, обеспечивающих максимальное напряжение порядка 6 *в*. При остальных пределах измерений омметр питается от одного элемента ФБС, имеющего максимальную э. д. с. 1,5 *в*. Неизменность тока в цепи индикатора обеспечивается с помощью ступенчатого шунта, включенного параллельно индикатору.

Расчет многопредельного омметра при исходном (обычно наивысшем) пределе измерений имеет некоторые особен-

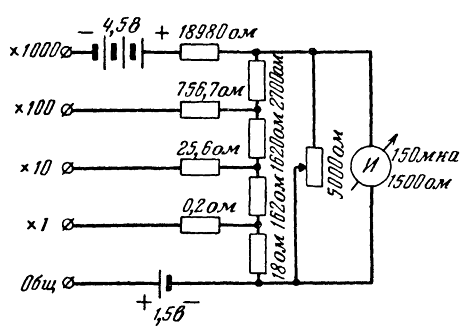
4*

ности по сравнению с расчетом однопредельного омметра, что налагает ряд ограничений на выбор элементов схемы. Эти ограничения касаются прежде всего выбора шунтирующих индикатор сопротивлений $R_{шс}$ и $R_{ш\ макс\ 1}$ (фиг. 14), общее сопротивление которых определяет расчетное сопротивление

$$R_{ш\ макс} = \frac{R_{шс} R_{ш\ макс\ 1}}{R_{шс} + R_{ш\ макс\ 1}}. \qquad (46)$$

Очевидно, что как $R_{шс}$, так и $R_{ш\ макс\ 1}$ по величине своей должны быть больше их общего сопротивления $R_{ш\ макс}$. Если известно одно из этих сопротивлений, например $R_{шс}$, то величина второго сопротивления (в данном случае $R_{ш\ макс\ 1}$) выбирается по формуле

$$R_{ш\ макс\ 1} \geqslant \frac{R_{шс} R_{ш\ макс}}{R_{шс} - R_{ш\ макс}}. \qquad (47)$$



Фиг. 15. Схема многопредельного омметра авометра типа ТТ-1.

Осуществление многопредельного омметра оказывается возможным лишь в том случае, если сопротивление ступенчатого шунта не превосходит определенного значения. При большой величине $R_ш$ может оказаться, что для одного или нескольких пределов измерений, рассчитанных на измерения более малых величин сопротивлений, общее сопротивление цепи индикатора и шунта будет больше заданного для этих пределов измерений входного сопротивления омметра. Для этих пределов измерений сопротивление рассматриваемой цепи в основном определяется сопротивлением шунта, величина которого обычно значительно меньше сопротивления цепи индикатора. Так, например, для схемы омметра фиг. 14 можно считать, что при пределе измерений *IV* сопротивление правой части схемы между точками *а* и *г* $R_{аг} = R_{шс3}$, так как $R_{шс3} \ll R_{шс1} + R_{шс2}$.

При пределах измерений, предназначенных для измерения больших сопротивлений, получение заданного входного сопротивления облегчается тем, что общее сопро-

тивление параллельной цепи уменьшается из-за усиления шунтирующего действия цепи индикатора. Поэтому если для предела измерения, которому соответствуют наименьшее значение R_i и наименьшие значения измеряемых сопротивлений, сопротивление шунтирующего участка равно входному сопротивлению или меньше его, то при всех других пределах измерений может быть получено заданное входное сопротивление.

В общем случае, если омметр имеет p пределов, то для его нормальной работы на всех пределах необходимо выполнение следующего условия:

$$R_{шср} \leqslant R_{ip}, \tag{48}$$

где $R_{шср}$ — сопротивление наименьшего участка ступенчатого шунта, а R_{ip} — входное сопротивление омметра на p-м пределе.

Предположим, что при переходе от первого предела к p-му пределу, которому соответствует входное сопротивление $R_{ip} = \frac{R_i}{N_{макс}}$, напряжение питания было уменьшено в $H_{макс}$ раз, а ток в цепи питания увеличился в $T_{макс}$ раз. Если обозначить через n число элементов батареи питания, то очевидно, что $H_{макс} = n$, так как максимальное уменьшение напряжения питания возможно только в число раз, равное числу отдельных элементов батареи. Следовательно, входное сопротивление омметра при работе на p-том пределе

$$R_{ip} = \frac{R_{i1}}{N_{макс}} = \frac{R_{i1}}{H_{макс} T_{макс}} = \frac{R_{i1}}{nT_{макс}}. \tag{49}$$

При увеличении тока в цепи питания в $T_{макс}$ раз ток в цепи индикатора останется неизменным при сопротивлении участка ступенчатого шунта:

$$R_{шср} = \frac{R_{шс}}{T_{макс}}. \tag{50}$$

Подставляя полученные выражения для R_{ip} и $R_{шср}$ в формулу (48), получаем условие, определяющее выбор полного сопротивления ступенчатого шунта:

$$R_{шс} \leqslant \frac{R_{i1}}{n}. \tag{51}$$

Таким образом, сопротивление ступенчатого шунта должно быть меньше максимального входного сопротивления омметра не менее чем в n раз. С другой стороны, $R_{шс}$ должно обязательно превышать расчетное сопротивление $R_{ш\,макс}$. При этом $R_{шс}$ должно быть больше $R_{ш\,макс}$ (не меньше чем на 20—40%), так как это позволит применить регулятор $R_{ш\,макс1}$ с меньшим сопротивлением, что в свою очередь облегчит установку „нуля". Если исходить из условия, что сопротивление регулятора $R_{ш\,макс1}$ может превосходить сопротивление $R_{ш\,макс}$ не более чем в 6 раз, то выбор сопротивления ступенчатого шунта будет определяться условием

$$1{,}2\,R_{ш\,макс} \leqslant R_{шс} \leqslant \frac{R_{i1}}{n}. \qquad (52)$$

Возможность выполнения данного условия будет обеспечена лишь в том случае, если при расчете исходного предела измерений омметра выбрано надлежащее значение сопротивления $R_{ш\,макс}$, удовлетворяющее требованию

$$R_{ш\,макс} \leqslant \frac{R_{i1}}{1{,}2n}. \qquad (53)$$

Допустимые значения сопротивления $R_{ш\,макс}$ определяются напряжением питания и возможными пределами его изменения. Следовательно, в конечном итоге нормальная работа омметра при всех его пределах измерений обеспечивается соответствующим выбором напряжения питания.

Выше было показано, что для схем омметров фиг. 9, 10 и 11 максимально необходимое напряжение питания определяется формулой

$$U_{макс} = I_n R_{i1}\left(1 + \frac{R_u}{R_{ш\,макс}}\right)\frac{U_{макс}}{U_{мин}}. \qquad (54)$$

Учитывая допустимые значения $R_{ш\,макс}$, а также то, что $U_{макс} = nU_э$, где $U_э$ — максимальное напряжение, обеспечиваемое одним элементом батареи питания, находим:

$$nU_э \geqslant I_n R_{i1}\left(1 + \frac{1{,}2nR_u}{R_{i1}}\right)\frac{U_{макс}}{U_{мин}}. \qquad (55)$$

Решая неравенство относительно n, получаем формулу, определяющую выбор числа элементов батареи питания:

$$n \geqslant \frac{I_n R_{i1}}{U_э - 1{,}2 I_n R_и \dfrac{U_{макс}}{U_{мин}}} \cdot \frac{U_{макс}}{U_{мин}}. \qquad (56)$$

Если необходимое число элементов батареи питания n больше коэффициента перекрытия N, то желательно выбирать число элементов таким образом, чтобы отношение $\frac{n}{N}$ было равно целому числу; это значительно упростит расчет омметра. В противном случае (т. е. если n не кратно N) при переходе ко второму пределу измерений необходимое при этом пределе измерений число элементов, определяемое отношением $\frac{n}{N}$, округляется до целого значения в сторону бо́льших величин. Например, если при пределе измерений I $n = 25$, а коэффициент перекрытия $N = 10$, то при пределе измерений II число элементов батареи питания берется равным трем. В этом случае расчет сопротивлений $R_{ш\ макс}$, $R_{шс}$ и $R_{ш\ макс1}$ производится, исходя из предела измерений II, а для предела измерений I лишь проверяется соответствие выбранного значения $R_{ш\ макс}$ его напряжению питания.

11. О ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЙ МНОГОПРЕДЕЛЬНЫМИ ОММЕТРАМИ

Основная погрешность многопредельного омметра практически не зависит от предела измерений. Ее величина может быть найдена по графику фиг. 4 в зависимости от класса точности индикатора и коэффициента перекрытия N, определяющего границы используемого участка шкалы. Дополнительную погрешность, вызываемую изменением температуры, для всех пределов измерений также можно считать одинаковой. Только дополнительная погрешность, обусловленная изменением напряжения питания, при переходе с одного предела измерений на другой претерпевает резкие изменения.

В многопредельном омметре наибольшая дополнительная погрешность имеет место при том пределе измерений, которому соответствуют одновременно наименьшее напряжение питания и наименьшая степень шунтирования цепи индикатора. Возможная величина этой погрешности может быть определена в зависимости от исходных данных и типа выбранной схемы по одной из формул (14),

(26) или (36). Подставляемые в эти формулы величины $U_{макс}$ или $U_{мин}$ должны соответствовать значениям напряжений, обеспечиваемых одним элементом выбранного типа. Например, при работе с элементами типа ФБС $U_{макс} = U_э = 1{,}5$ *в*, а $U_{мин}$ определяется в зависимости от допустимого значения $\frac{U_{макс}}{U_{мин}}$ или коэффициента $\varepsilon_{макс}$.

При пределах измерений, которым соответствует более высокое напряжение питания, возрастает необходимая величина добавочного сопротивления $R_д$, вследствие чего изменение сопротивления цепи индикатора в процессе регулировки „нуля" меньше влияет на величину входного сопротивления омметра, что приводит к повышению точности измерения. Точно так же уменьшение сопротивления участка ступенчатого шунта, включенного параллельно цепи индикатора при пределах измерений, предназначенных для измерения относительно небольших сопротивлений, вызывает ослабление влияния сопротивления регулятора „нуля" на величину входного сопротивления.

В общем случае при переходе от одного предела измерений к другому изменение дополнительной погрешности пропорционально отношению $\frac{H}{T}$. Так, например, в омметре авометра ТТ-1 при переходе от предела измерений *I* к пределу измерений *II* входное сопротивление уменьшается в $N = 10$ раз. При этом напряжение питания уменьшается в $H = 4$ раза, а ток в цепи питания возрастает в $T = \frac{N}{H} = 2{,}5$ раза. Отношение $\frac{H}{T} = 1{,}6$ и, следовательно, при измерениях с пределом измерений *II* дополнительная погрешность возрастает в 1,6 раза по сравнению с погрешностью при измерениях с пределом измерений *I*. Переход к пределу измерений *III* производится без изменения напряжения питания. Поэтому $H = 1$, $T = 10$, а $\frac{H}{T} = 0{,}1$. Следовательно, при переходе от предела измерений *II* к пределу *III* дополнительная погрешность, связанная с изменением напряжения питания, уменьшается в 10 раз. При пределе измерений *IV* величина дополнительной погрешности уменьшается еще в 10 раз.

Из рассмотренного примера можно было бы заключить, что при пределе измерений, рассчитанном на измерение наименьших сопротивлений, точность измерения наиболь-

шая. Однако при последнем пределе измерений омметра, для которого входное сопротивление может оказаться весьма небольшим (порядка десятков ом), погрешность измерений часто возрастает вследствие трудно учитываемого влияния внутреннего сопротивления источника питания.

Известно, что с разрядом элементов их внутреннее сопротивление возрастает. Так, например, для сухих элементов в начале разряда при э. д. с. порядка 1,5 *в* внутреннее сопротивление равно $0{,}3 \div 0{,}5$ *ом*, а в конце разряда с уменьшением э. д. с. до 0,7 *в* оно возрастает до $3 \div 5$ *ом*. Учитывая, что элементы, употребляемые в омметрах, обычно используются не до полного разряда, следует считаться с возможностью возрастания внутреннего сопротивления в процессе эксплуатации омметра до $2 \div 3$ *ом* на один элемент. Поэтому в омметрах с целью некоторой компенсации влияния внутреннего сопротивления источника питания величину добавочного сопротивления $R_д$ при работе на пределе с наименьшим входным сопротивлением часто уменьшают на $1 \div 2$ *ом* относительно ее расчетного значения.

Следует также учитывать, что когда напряжение питания уже снижено до возможного минимума, уменьшение входного сопротивления приводит к сильному увеличению тока в цепи питания, что может вызвать поляризацию элемента, еще большее возрастание его внутреннего сопротивления и сокращение срока службы. Вследствие этого минимально допустимая величина входного сопротивления при работе омметра по последовательной схеме ограничивается значением

$$R_{i\ доп} = \frac{U_э}{I_{доп}}, \qquad (57)$$

где $I_{доп}$ — максимально допустимый ток в цепи питания.

Так, например, при питании омметров от сухих элементов типа ФБС, для которых $U_э = 1{,}5$ *в*, а допустимый ток при кратковременной нагрузке можно считать равным 75 *ма*, входное сопротивление омметра не должно быть меньше $R_{i\ доп} = \frac{1{,}5}{0{,}075} = 20$ *ом*.

При питании от аккумуляторных батарей, для которых допустимый расходный ток может достигать большой величины, входное сопротивление может быть взято порядка нескольких ом или даже долей ома. Однако и

при этом омметр не обеспечивает измерения очень малых сопротивлений.

Вследствие указанных выше причин омметры, работающие по последовательной схеме, применяются главным образом для измерения сопротивлений средних и больших величин, когда можно пренебречь внутренним сопротивлением источника питания и когда ток в цепи питания не превосходит допустимого значения.

12. РАСЧЕТ МНОГОПРЕДЕЛЬНОГО БАТАРЕЙНОГО ОММЕТРА

Пример 5. Рассчитать схему батарейного омметра с параллельным включением регулятора „нуля“ на предел измерений $R_{x\,мин} \div R_{x\,макс} = 20 \div 300\,000$ *ом* при допустимой основной погрешности $K_{макс} = 15\%$.

Индикатор омметра — микроамперметр типа М-49 класса 2,5 — имеет следующие данные: $I_n = 200$ *мка*; $R_u = 700$ *ом*.

При изменении напряжения питания в пределах $\pm 20\%$ от расчетного значения (т. е. при $\varepsilon_{макс} = \pm 0{,}2$), что соответствует отношению $\frac{U_{макс}}{U_{мин}} = 1{,}5$, дополнительная погрешность измерений не должна превышать 3% ($K_{д\,макс} \leqslant 0{,}03$).

Батарею питания составить из сухих элементов типа ФБС или аналогичного типа, дающих напряжение $U_э = 1{,}5$ *в*.

Расчет многопредельного омметра, принципиальная схема которого изображена на фиг. 14, ведется в следующей последовательности.

А. Предварительный расчет общих данных омметра

1. По графику фиг. 4 находим, что при индикаторе класса 2,5 и допустимой основной погрешности $K_{макс} = 15\%$ рабочий участок шкалы ограничивается значениями $\frac{R_{x\,мин1}}{R_{i1}} \approx 0{,}26$ и $\frac{R_{x\,макс1}}{R_{i1}} \approx 4{,}5$, что соответствует коэффициенту перекрытия $N = \frac{4{,}5}{0{,}26} \approx 17{,}3$.

Выбираем $N = 10$. При этом рабочий участок шкалы ограничивается значениями $\frac{R_{x\,мин1}}{R_{i1}} = \frac{1}{\sqrt{10}} \approx 0{,}317$ и $\frac{R_{x\,макс1}}{R_{i1}} = \sqrt{10} \approx 3{,}16$, при которых основная погрешность измерений не превышает 13,5%.

2. Необходимое число пределов измерений омметра определяем по формуле (40):

$$p \approx \lg 15\,000 = 4{,}176.$$

Выбираем $p = 4$.

3. По формуле (41) находим расчетное входное сопротивление омметра при пределе измерений I:

$$R_{i1} = \frac{300\,000}{\sqrt{10}} \approx 95\,000 \text{ ом}.$$

Выбираем $R_{i1} = 100\,000$ *ом*. Тогда для предела измерений II $R_{i2} = 10\,000$ *ом*, для предела III $R_{i3} = 1\,000$ *ом* и для предела IV $R_{i4} = 100$ *ом*.

При выбранных входных сопротивлениях для заданного предела измерений $20 \div 300\,000$ *ом* основная погрешность не превосходит допустимого значения, за исключением небольшого участка вблизи $R_x = 20$ *ом*. При пределе измерений IV при $R_x = 20$ *ом* (при этом $\frac{R_x}{R_{i4}} = 0{,}2$) $K = 17\%$, что можно вполне допустить.

4. Максимально возможную дополнительную погрешность находим по формуле (14):

$$K_{д\,макс} = \frac{0{,}2}{\frac{1}{200 \cdot 10^{-6} \cdot 700} - 1} \approx 0{,}033,$$

где $U_{мин} = \frac{U_э}{1{,}5} = \frac{1{,}5}{1{,}5} = 1$ *в*.

Следует учесть два обстоятельства: 1) дополнительная погрешность, соответствующая вычисленному значению $K_{д\,макс}$, может иметь место лишь при одном пределе измерений омметра; 2) следует ожидать, что наибольшая величина дополнительной погрешности будет меньше вычисленной, так как в большинстве случаев при переходе от предела измерений с большим напряжением питания к пределу, в котором используется один элемент питания, одновременно усиливается шунтирование цепи индикатора, что уменьшает погрешность измерений.

Поэтому хотя возможная (определенная по предварительному расчету) величина дополнительной погрешности несколько превышает допустимую величину, изменения исходных данных омметра производить не следует.

Б. Расчет исходного (первого) предела измерений омметра ($R_{i1} = 100\,000$ *ом*)

1. Необходимое число элементов батареи питания находим по формуле (56):

$$n \geqslant \frac{200 \cdot 10^{-6} \cdot 100\,000}{1{,}5 - 1{,}2 \cdot 200 \cdot 10^{-6} \cdot 700 \cdot 1{,}5} \cdot 1{,}5 \approx 24.$$

Учитывая желательность кратности n и N, выбираем батарею питания, состоящую из 30 элементов, обеспечивающих максимальное напряжение

$$U_{макс\,1} = 30 \cdot 1{,}5 = 45 \text{ в},$$

2. Минимально допустимое напряжение питания

$$U_{мин1} = \frac{45}{1,5} = 30 \text{ в.}$$

3. Расчетное напряжение

$$U_{01} = \frac{45 + 30}{2} = 37,5 \text{ в.}$$

4. Добавочное сопротивление находим по формуле (13):

$$R_{д1} = 100\,000 \left(1 - \frac{200 \cdot 10^{-6} \cdot 700}{37,5}\right) \approx 99\,600 \text{ ом.}$$

5. Полное сопротивление шунта определим по формуле (10):

$$R_{ш\,макс} \geqslant \frac{200 \cdot 10^{-6} \cdot 700 \cdot 99\,600}{30 - 200 \cdot 10^{-6} (700 + 99\,600)} \approx 1\,400 \text{ ом.}$$

Для обеспечения нормальной работы омметра при всех пределах измерений необходимо, чтобы ссблюдалссь неравенство (53):

$$R_{ш\,макс} \leqslant \frac{100\,000}{1,2 \cdot 30} \approx 2\,780 \text{ ом.}$$

Выбираем $R_{ш\,макс} = 1\,600$ *ом.*

6. Сопротивление шунта при расчетном напряжении питания определяем по формуле (9):

$$R_{ш0} = \frac{200 \cdot 10^{-6} \cdot 700 \cdot 99\,600}{37,5 - 200 \cdot 10^{-6} (700 + 99\,600)} = 800 \text{ ом.}$$

7. Максимально возможную величину дополнительной пcгрешности находим по формуле (14):

$$K_{д\,макс\,1} = \frac{0,2}{\dfrac{30}{200 \cdot 10^{-6} \cdot 700} - 1} \approx 0,001,$$

т. е. не превышает 0,1% и с нею можно практически не считаться.

В. Расчет сопротивлений ступенчатого шунта и реостата установки „нуля"

1. Сопротивление ступенчатого шунта должно удовлетворять условию (52):

$$1,2 \cdot 1\,600 \leqslant R_{шс} \leqslant \frac{100\,000}{30}.$$

Выбираем $R_{шс} = 3\,000$ *ом.*

2. Полное сопротивление реостата установки „нуля" определяем по формуле (47):

$$R_{ш\,макс\,1} \geqslant \frac{3\,000 \cdot 1\,600}{3\,000 - 1\,600} \approx 3\,420 \text{ ом.}$$

Выбираем $R_{ш\,макс1} = 5\,000$ *ом,*

3. Сопротивление реостата при расчетном напряжении U_{01} находим по формуле

$$R_{ш1}=\frac{R_{шс}\cdot R_{ш0}}{R_{шс}-R_{ш0}}=\frac{3\,000\cdot 800}{3\,000-800}\approx 1\,090 \text{ ом}.$$

4. Общее сопротивление индикатора и шунта между точками *д* и *е* в соответствии со схемой фиг. 14:

$$R_{де}=\frac{R_{ш1}R_{и}}{R_{ш1}+R_{и}}=\frac{1\,090\cdot 700}{1\,090+700}\approx 426 \text{ ом}.$$

Г. Расчет второго предела измерений омметра (R_{i2} = 10 000 *ом*)

1. Переход к пределу измерений *II* может быть произведен путем изменения в $N=10$ раз напряжения питания. Поэтому

$$U_{макс\ 2}=\frac{45}{10}=4{,}5 \text{ в и } U_{мин2}=\frac{4{,}5}{1{,}5}=3 \text{ в}.$$

Это напряжение обеспечивается тремя элементами типа ФБС.

2. Общее сопротивление цепи ндикатора и шунта

$$R_{аб}=\frac{R_{шс}R_{де}}{R_{шс}+R_{де}}=\frac{3\,000\cdot 426}{3\,000+426}\approx 373 \text{ ом}.$$

3. Добавочное сопротивление

$$R_{д2}=R_{i2}-R_{аб}=10\,000-373=9\,627 \text{ ом}.$$

4. Максимально возможная величина дополнительной погрешности определяется по формуле (14):

$$K_{д\ макс\ 2}=\frac{0{,}2}{\dfrac{3}{200\cdot 10^{-6}\cdot 700}-1}\approx 0{,}01,$$

т. е. не превышает 1%.

Д. Расчет третьего предела измерений омметра (R_{i3} = 1 000 *ом*)

1. Переход к пределу измерений *III* нельзя осуществить лишь одним изменением напряжения питания, которое может быть снижено только в $H=3$ раза до напряжения $U_{макс\ 3}=1{,}5$ *в*, обеспечиваемого одним элементом. Поэтому при выбранном входном сопротивлении ток в цепи питания увеличится в

$$T=\frac{N}{H}=\frac{10}{3}\approx 3{,}33 \text{ раза}.$$

2. Сопротивление шунтирующего участка ступенчатого шунта

$$R_{шс2}+R_{шс3}=\frac{R_{шс}}{T}=\frac{3\,000}{3{,}33}\approx 900 \text{ ом}.$$

Следовательно,

$$R_{шс1} = R_{шс} - (R_{шс2} + R_{шс3}) = 3\,000 - 900 = 2\,100 \text{ ом.}$$

3. Общее сопротивление цепи индикатора и шунта

$$R_{ав} = \frac{(R_{шс2} + R_{шс3})(R_{шс1} + R_{де})}{R_{шс} + R_{де}} = \frac{900\,(2\,100 + 426)}{3\,000 + 426} \approx 660 \text{ ом.}$$

4. Добавочное сопротивление

$$R_{д3} = R_{i3} - R_{ав} = 1\,000 - 660 = 340 \text{ ом.}$$

5. Максимально возможная дополнительная погрешность

$$K_{д\,макс3} = \frac{H}{T} K_{д\,макс2} = \frac{3 \cdot 0{,}01}{3{,}33} \approx 0{,}009,$$

т. е не превышает 0,9%.

Е. Расчет четвертого предела измерений омметра ($R_{i4} = 100$ *ом*)

1. При переходе к пределу измерений *IV* напряжение питания остается без изменения ($H = 1$), т. е. $U_{макс4} = 1{,}5$ *в*. Следовательно, ток в цепи питания по сравнению с пределом измерений *III* должен возрасти в $T = 10$ раз.

2. Сопротивление шунтирующего участка ступенчатого шунта

$$R_{шс3} = \frac{R_{шс2} + R_{шс3}}{N} = \frac{900}{10} = 90 \text{ ом.}$$

Следовательно,

$$R_{шс2} = (R_{шс2} + R_{шс3}) - R_{шс3} = 900 - 90 = 810 \text{ ом.}$$

3. Общее сопротивление цепи индикатора и шунта

$$R_{аг} = \frac{R_{шс3}(R_{шс2} + R_{шс1} + R_{де})}{R_{шс} + R_{де}} =$$

$$= \frac{90\,(810 + 2\,100 + 426)}{3\,000 + 426} \approx 87{,}6 \text{ ом.}$$

4. Добавочное сопротивление

$$R_{д4} = R_{i4} - R_{аг} = 100 - 87{,}6 = 12{,}4 \text{ ом.}$$

Учитывая внутреннее сопротивление источника питания, величину добавочного сопротивления уменьшаем до значения $R_{д4} = 11$ *ом*.

5. Максимально возможная дополнительная погрешность

$$K_{д\,макс4} = \frac{K_{д\,макс3}}{10} = \frac{0{,}009}{10} = 0{,}0009,$$

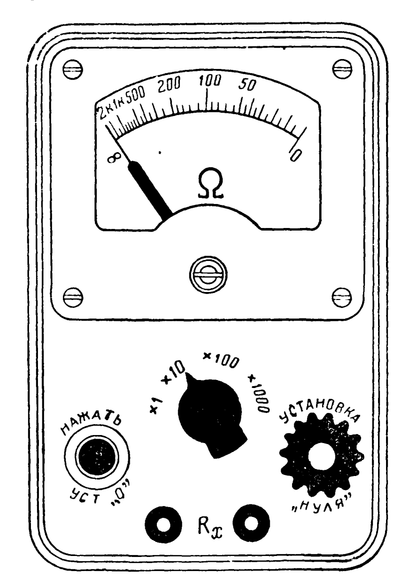
т. е. не превышает 0,09%.

Ж. Общие замечания по схеме омметра

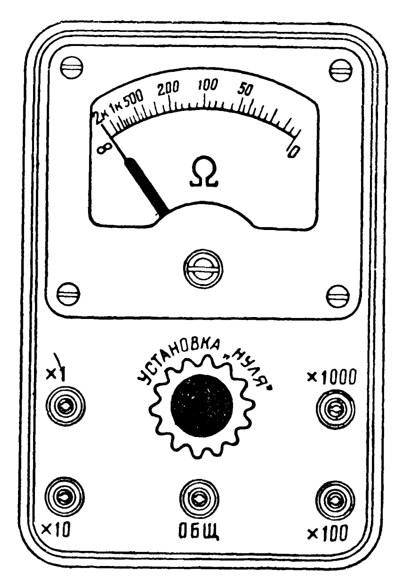
Из схемы многопредельного омметра фиг. 14 видно, что омметр содержит три батареи питания.

При пределах измерений *IV* и *III* необходимое напряжение питания $U_{макс\,4} = U_{макс\,3} = 1{,}5$ *в* обеспечивается батареей U_3, состоящей

из одного элемента. При пределе измерений *II* питание омметра осуществляется от двух последовательно соединенных батарей U_2 и U_3 с максимальным напряжением $U_{макс2} = 4{,}5$ *в*. Очевидно, что батарея U_2 должна состоять из двух элементов. При пределе измерений *I* требуется наибольшее напряжение питания $U_{макс\,1} = 45$ *в*, которое обеспечивается батареями U_1 и U_2. Так как общее число элементов должно быть равно 30, то очевидно, что батарея U_1 должна содержать 29 элементов.



Фиг. 16. Передняя панель многопредельного омметра с переключателем предела измерений.



Фиг. 17. Передняя панель многопредельного омметра с системой гнезд.

Следует отметить, что из соображений удобства напряжение батареи может быть взято несколько отличным от расчетного значения, так как реостат $R_{ш1}$ принципиально позволяет произвести установку „нуля" при любом напряжении, превышающем $U_{мин1} = 30$ *в*. Небольшое возрастание погрешности измерений в данном случае не играет существенной роли. Поэтому выбираем в качестве батареи U_1 сухую батарею типа БАС-60, используя ее 40-*в* часть. 20-*в* часть батареи дополнительно включается после разряда ранее используемой части батареи.

Для удобства установки „нуля" омметр может быть снабжен кнопкой *К*, при нажатии которой замыкаются входные зажимы прибора.

Градуировку шкалы омметра удобнее всего производить по формуле (3) для предела измерений *IV*. В этом случае полученные отсчеты при измерении сопротивлений при пределах измерений *III*, *II* или *I* следует умножать соответственно на 10, 100 или 1 000.

На фиг. 16 и 17 приведен внешний вид передней панели двух конструкций многопредельных омметров, собранных по схеме фиг. 14.

Глава пятая

СЕТЕВЫЕ ОММЕТРЫ

13. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СЕТЕВЫХ ОММЕТРАХ

Расширение предела измерений в сторону больших сопротивлений требует увеличения напряжения питания. Даже при наличии высокочувствительных индикаторов с током полного отклонения $50 \div 100$ *мка* измерение сопротивлений порядка десятков мегом требует увеличения напряжения питания до сотен вольт, что при использовании сухих или аккумуляторных батарей представляет большое затруднение.

Необходимость измерения больших сопротивлений при высоком напряжении питания имеет и свою положительную сторону, так как приближает испытание таких сопротивлений, как сопротивление изоляции, к рабочим условиям.

Получение постоянных напряжений большой величины наиболее просто достигается в индукторных и сетевых омметрах. Индукторные омметры обычно конструируются как переносные приборы, предназначенные для использования практически в любых условиях эксплуатации. Сетевые омметры могут применяться лишь там, где имеется электрическая сеть, необходимая для их питания. В настоящее время, при широкой электрификации всего народного хозяйства нашей страны, это ограничение мало существенно не только для городов, но и для большинства сельских местностей. Поэтому сетевые омметры получили сравнительно широкое применение в радиолюбительской практике.

Одной из основных частей сетевых омметров является выпрямитель (обычно ламповый или селеновый), позволяющий получить выпрямленное напряжение порядка сотен или тысяч вольт.

По принципу действия сетевые омметры мало отличаются от батарейных омметров. Основное различие между ними — в системе питания. В батарейных омметрах изменение напряжения питания может осуществляться лишь скачкообразно путем изменения числа элементов батареи питания. Возможности плавной регулировки напряжения питания с помощью потенциометра, включенного параллельно источнику, здесь весьма ограничены вследствие недопустимости длительного разряда батареи на сравнительно малое сопротивление потенциометра.

Достоинством сетевых омметров является то, что они позволяют легко получить постоянное напряжение любой практически необходимой величины путем соответствующего расчета схемы выпрямителя. Обычно выпрямитель нагружается на делитель напряжения. Поэтому скачкообразное изменение напряжения питания или плавная его регулировка не встречают затруднений.

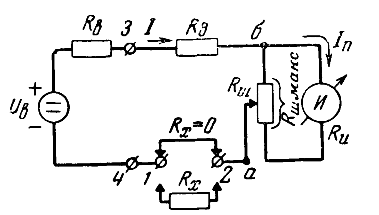
К сетевым омметрам могут быть также отнесены омметры, питаемые от сети постоянного тока, причем их особенностью является то, что максимальное напряжение питания ограничивается напряжением питающей сети. Кроме того, в этих омметрах с достаточной для практики точностью можно пренебречь внутренним сопротивлением источника.

Сетевые омметры разделяются на две основные группы: омметры с регулируемой чувствительностью индикатора и омметры с регулируемым напряжением питания.

14. СЕТЕВЫЕ ОММЕТРЫ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ ИНДИКАТОРА

Сетевой омметр может быть осуществлен по любой из схем фиг. 9, 10 и 11, находящих широкое применение в батарейных омметрах.

Одна из подобных схем с балансной регулировкой „нуля" изображена на фиг. 18. Так как схема выпрямителя для работы омметра никакого принципиального значения не имеет, на чертеже показаны лишь зажимы питания омметра *3* и *4*, к которым подключен источник постоянного напряжения $U_в$, имеющий внутреннее сопротивление $R_в$. Следует учитывать, что внутреннее сопротивление выпрямителей может достигать нескольких сотен или тысяч ом и поэтому им не всегда можно пренебрегать.



Фиг. 18. Схема сетевого омметра с балансной регулировкой „нуля".

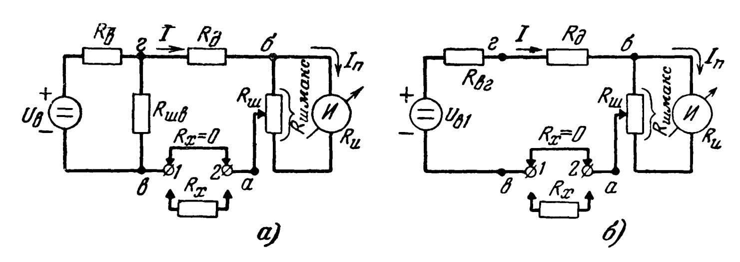
Входное сопротивление рассматриваемой схемы

$$R_i = R_в + R_д + R_{аб},$$

где $R_{аб}$ — общее сопротивление цепи индикатора и шунта между точками *а* и *б*.

Расчет схемы омметра фиг. 18 ничем не отличается от расчета аналогичной схемы фиг. 10, за исключением того, что расчетное значение добавочного сопротивления $R_д$ уменьшают на величину внутреннего сопротивления источника.

Если напряжение на зажимах источника питания превосходит требуемую величину, уменьшения напряжения питания можно достигнуть путем шунтирования источника сопротивлением $R_{шв}$, образующим с внутренним сопротивлением $R_в$ делитель напряжения, как это показано на фиг. 19,*а*. Такой метод уменьшения напряжения питания



Фиг. 19. Схема сетевого омметра с делителем напряжения.
а — принципиальная; *б* — эквивалентная.

целесообразен только при большом внутреннем сопротивлении $R_в$, так как при малой величине этого сопротивления шунтирующее сопротивление должно иметь также малую величину, в результате чего источник питания будет нагружаться большим током, протекающим по сопротивлению $R_{шв}$.

Можно показать, что при подключении к омметру фиг. 19,*а* измеряемого сопротивления R_x в общей цепи омметра протекает ток

$$I = \frac{U_в}{R_i + R_x} \cdot \frac{R_{шв}}{R_{шв} + R_в},$$

где $R_i = R_{вг} + R_д + R_{аб}$ — входное сопротивление омметра, а $R_{вг} = \frac{R_{шв} R_в}{R_{шв} + R_в}$ — сопротивление левой части схемы фиг. 19,*а* между точками *в* и *г*.

Рассматривая соответствующую величину тока I при $R_x = 0$ и учитывая, что изменение тока в общей цепи

вызывает пропорциональное изменение тока в цепи индикатора, находим, что отношение токов, протекающих через индикатор,

$$\frac{I_x}{I_n} = \frac{R_i}{R_i + R_x},$$

т. е. получаем формулу (3) градуировки последовательных схем омметров.

Формула для тока I показывает, что схема фиг. 19,*а* может быть заменена эквивалентной схемой фиг. 19,*б*, подобной схеме фиг. 18, в которой напряжение источника

$$U_{в1} = U_в \cdot \frac{R_{шв}}{R_{шв} + R_в},$$

а внутреннее сопротивление источника $R_{вг}$.

Если $U = U_{в1}$ — расчетное напряжение питания омметра, то необходимая величина шунтирующего сопротивления

$$R_{шв} = (R_{шв} + R_в)\frac{U}{U_в}.$$

В том случае, если по каким-либо соображениям произведен выбор шунтирующего сопротивления $R_{шв}$, величина внутреннего сопротивления источника питания должна быть равна:

$$R_в = R_{шв}\left(\frac{U_в}{U} - 1\right). \qquad (58)$$

При этом следует учитывать, что внутреннее сопротивление $R_в$ можно изменять в сторону увеличения, начиная от некоторого исходного значения, путем включения последовательно с источником питания постоянного (а в некоторых случаях и переменного) сопротивления.

Изменение напряжения питания, компенсируемое при регулировке „нуля", приводит к изменению сопротивления $R_{аб}$, а следовательно, и входного сопротивления омметра. Дополнительная погрешность, имеющая при этом место, а также напряжение источника питания, при котором погрешность не превосходит заданного значения, могут быть определены в зависимости от типа выбранной схемы по формулам (14), (18), (26), (36) и (37).

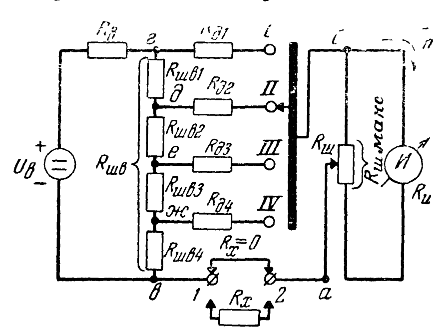
Добавочное сопротивление и сопротивления делителя напряжения должны удовлетворять условию

$$R_{вг} + R_д = R_i - R_{аб}. \qquad (59)$$

5*

При выборе этих сопротивлений следует учитывать, что малая величина сопротивления $R_{вг}$ приводит к увеличению тока в цепи питания; поэтому необходимо брать сопротивление $R_{вг}$ возможно большей величины, соответственно уменьшая сопротивление $R_{д}$.

На основе рассмотренной схемы может быть составлена схема многопредельного омметра. Подобная схема сетевого омметра на четыре предела измерений показана на фиг. 20. В этой схеме шунтирующее сопротивление $R_{шв}$ делителя напряжения составляется из отдельных сопротивлений. Переход от одного предела измерений на другой производится путем скачкообразного изменения напряжения питания. Очевидно, что наибольшая погрешность измерений имеет место при работе на пределе с наименьшим напряжением питания. Поэтому если для этого предела дополнительная погрешность не превосходит допустимого значения, то для других пределов она становится пренебрежимо малой, уменьшаясь от предела к пределу в N раз.



Фиг. 20. Схема многопредельного сетевого омметра с регулируемой чувствительностью индикатора.

Расчет схемы сетевого многопредельного омметра в отличие от расчета схем батарейных омметров следует начинать с наинизшего предела измерений, которому соответствуют наименьшее входное сопротивление и наименьшее напряжение питания. Этот расчет ведется обычными для исходной схемы методами. Затем производится расчет наивысшего предела измерений и промежуточных пределов. Такой порядок расчета обеспечивает работу омметра при наименьшем напряжении питания, а также соответствие выбранных исходных величин всем пределам омметра.

Производя расчет многопредельного омметра, следует учитывать, что при наличии p пределов измерения и переходном коэффициенте N соотношение между входными

сопротивлениями омметра на первом и p-м пределах выражается формулой

$$R_{i1} = R_{ip} \cdot N^{p-1}.$$

Аналогичные соотношения будут между напряжениями питания и шунтирующими сопротивлениями делителя напряжения, а именно:

$$U_1 = U_p \cdot N^{p-1} \qquad (60)$$

и

$$R_{шв} = R_{швp} \cdot N^{p-1}. \qquad (61)$$

15. РАСЧЕТ МНОГОПРЕДЕЛЬНОГО СЕТЕВОГО ОММЕТРА С РЕГУЛИРУЕМОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ ИНДИКАТОРА

Пример 6. Рассчитать схему сетевого омметра с балансной регулировкой „нуля" типа I на предел измерений 1 *ком* ÷ 10 *мгом* при допустимой основной погрешности $K_{макс} = 15\%$.

Индикатор омметра — микроамперметр типа М-598 класса 2,5 — имеет следующие данные: $I_n = 100$ *мка*; $R_u = 800$ *ом*.

Выпрямитель омметра не содержит стабилизирующего устройства. Поэтому возможные изменения напряжения питания характеризуются отношением $\frac{U_{макс}}{U_{мин}} = 1{,}5$. При этом дополнительная погрешность измерений не должна превышать 1% ($K_{д\,макс} \leqslant 0{,}01$).

Расчет омметра, полная схема которого приведена на фиг. 20, производится в следующей последовательности.

А. Предварительный расчет общих данных омметра

1. По аналогии с примером 5, пользуясь графиком фиг. 4, находим, что при $K_u = 2{,}5\%$ и $K_{макс} = 15\%$ коэффициент перекрытия $N \approx 17{,}3$. Выбираем $N = 10$, при котором $K_{д\,макс} \approx 13{,}5\%$.

2. Необходимое число пределов измерений находим по формуле (40):

$$p = \lg 10\,000 = 4.$$

3. Входное сопротивление омметра при пределе измерений *I* согласно формулы (41):

$$R_{i1} = \frac{10}{\sqrt{10}} \approx 3{,}16 \text{ мгом}.$$

Выбираем $R_{i1} = 3$ *мгом*. Тогда $R_{i2} = 300$ *ком*, $R_{i3} = 30$ *ком* и $R_{i4} = 3$ *ком*.

Б. Расчет четвертого предела измерений омметра ($R_{i4} = 3$ *ком*)

Расчет ведется аналогично расчету, приведенному для выбранной исходной схемы в примере 3.

1. Находим $U_{опт4} = 0{,}75$ *в*, $U_{мин4} = 0{,}5$ *в* и $R_{ш\,макс} \geqslant 1\,200$ *ом*.

Выбираем $R_{ш\,макс} = 1\,200$ *ом*. Тогда $R_{ш\,мин2} = 0$, а $R_{ш\,мин1} = R_и = 800$ *ом*. Следовательно, сопротивление переменной части потенциометра должно быть не менее 400 *ом* и не более 1 200 *ом*. Если используется переменный потенциометр на 1 000 *ом*, то последовательно с ним включается постоянное сопротивление 200 *ом*.

2. По формуле (26) находим максимально возможную относительную дополнительную погрешность $K_{д\,макс4} = 0{,}0067$, т. е. 0,67%.

3. Общее сопротивление цепи индикатора и шунта

$$R_{аб} = \frac{R_{ш\,макс} R_и}{R_{ш\,макс} + R_и} = \frac{1\,200 \cdot 800}{1\,200 + 800} = 480 \text{ ом}.$$

4. Учитывая, что при пределе измерений *IV* сопротивление, включенное последовательно в цепь источника питания, значительно превышает сопротивление $R_{шв4}$, можно считать $R_{вж} = R_{шв4}$. Поэтому выбор сопротивлений $R_{шв4}$ и $R_{д4}$ производим, исходя из равенства

$$R_{шв4} + R_{д4} = R_{i4} - R_{аб} = 3\,000 - 480 = 2\,520 \text{ ом}.$$

Выбираем $R_{шв4} = 2\,500$ *ом*, а $R_{д4} = 20$ *ом*.

В. Расчет первого предела измерений омметра ($R_{i1} = 3$ *мгом*)

1. Полное сопротивление шунтирующей части делителя напряжения находим по формуле (61):

$$R_{шв} = 2\,500 \cdot 10^{4-1} = 2\,500\,000 \text{ ом} = 2\,500 \text{ ком}.$$

2. Максимально необходимое напряжение питания находим по формуле (60):

$$U_{макс1} = 0{,}75 \cdot 10^{4-1} = 750 \text{ в}.$$

3. Выбираем максимальное расчетное напряжение на выходе выпрямителя $U_в = 800$ *в*.

4. Для гашения излишка напряжения последовательно в цепь источника включаем сопротивление, которое с учетом внутреннего сопротивления источника должно быть по формуле (58)

$$R_в = 2{,}5 \cdot 10^6 \left(\frac{800}{750} - 1\right) \approx 166\,700 \text{ ом} = 166{,}7 \text{ ком}.$$

5. Сопротивление левой части схемы между точками *в* и *г*

$$R_{вг} = \frac{R_{шв} \cdot R_в}{R_{шв} + R_в} = \frac{2\,500 \cdot 166{,}7}{2\,500 + 166{,}7} \approx 156 \text{ ком}.$$

6. Добавочное сопротивление

$$R_{д1} = R_{i1} - R_{аб} - R_{вг} = 3\,000 - 0{,}48 - 156 \approx 2\,840 \text{ ком} = 2{,}84 \text{ мгом}.$$

Г. Расчет второго предела измерений омметра ($R_{i2} = 300$ *ком*)

1. Сопротивление шунтирующей части делителя напряжения

$$R_{шв2} + R_{шв3} + R_{шв4} = \frac{R_{шв}}{N} = \frac{2\,500}{10} = 250 \text{ ком}.$$

Отсюда

$$R_{шв1} = R_{шв} - (R_{шв2} + R_{шв3} + R_{шв4}) = 2\,500 - 250 = 2\,250 \ ком.$$

2. Сопротивление левой части схемы между точками *в* и *д*

$$R_{вд} = \frac{(R_{шв2} + R_{шв3} + R_{шв4})(R_{шв1} + R_в)}{R_{шв} + R_в} =$$

$$= \frac{250 \cdot (2\,250 + 166{,}7)}{2\,500 + 166{,}7} \approx 226 \ ком.$$

3. Добавочное сопротивление

$$R_{д2} = R_{i2} - R_{аб} - R_{вд} = 300 - 0{,}48 - 226 \approx 73{,}5 \ ком.$$

Д. Расчет третьего предела измерений омметра ($R_{i3} = 30$ *ком*)

1. Сопротивление шунтирующей части делителя

$$R_{шв3} + R_{шв4} = \frac{R_{шв}}{N^2} = \frac{2\,500}{10^2} = 25 \ ком.$$

Отсюда

$$R_{в3} = (R_{шв3} + R_{шв4}) - R_{шв4} = 25 - 2{,}5 = 22{,}5 \ ком$$

и

$$R_{шв2} = R_{шв} - (R_{шв1} + R_{шв3} + R_{шв4}) = 2\,500 - (2\,250 + 22{,}5 + 2{,}5) = 225 \ ком.$$

2. Сопротивление левой части схемы между точками *в* и *е*

$$R_{ве} = \frac{(R_{шв3} + R_{шв4})(R_{шв1} + R_{шв2} + R_в)}{R_{шв} + R_в} =$$

$$= \frac{25\,(2\,250 + 225 + 166{,}7)}{2\,500 + 166{,}7} \approx 24{,}8 \ ком.$$

3. Добавочное сопротивление

$$R_{д3} = R_{i3} - R_{аб} - R_{ве} = 30 - 0{,}48 - 24{,}8 \approx 4{,}7 \ ком.$$

Градуировка шкалы омметра (в килоомах) производится для предела измерений *IV* по формуле (3) с подстановкой $R_i = 3$ *ком*.

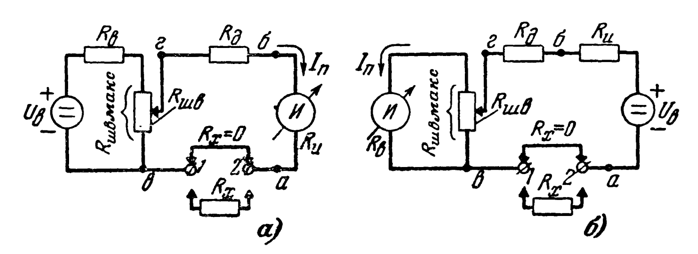
При использовании пределов измерений *III*, *II* и *I* отсчет умножается соответственно на 10, 100 и 1 000.

16. СЕТЕВЫЕ ОММЕТРЫ С РЕГУЛИРУЕМЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ ПИТАНИЯ

Установка „нуля“ в сетевых омметрах может производиться путем регулировки напряжения питания. Три основных способа осуществления такой регулировки показаны на схемах фиг. 21,*а*, 23,*а* и 24.

В схеме омметра фиг. 21,*а* шунтирующее сопротивление делителя напряжения $R_{шв}$ выполняется в виде переменного

потенциометра, позволяющего плавно изменять постоянное напряжение, снимаемое с делителя. Предположим, что при использовании омметра напряжение $U_в$ на выходе его выпрямителя в результате колебаний напряжения сети может изменяться в пределах $U_{макс} \div U_{мин}$. При этом минимально допустимое напряжение выпрямителя должно обязательно превышать расчетное напряжение питания $U_0 = I_п R_i$, т. е. $U_{мин} > U_0$. При напряжении $U_в = U_{мин}$ ползунок потенциометра должен занимать крайнее верхнее (по схеме) положение, при котором $R_{шв} = R_{шв\,макс}$. Если же напряжение $U_в > U_{мин}$, величину снимаемого с делителя напряжения уменьшают, перемещая ползунок делителя вниз.



Фиг. 21. Схема сетевого омметра с регулируемым напряжением питания (тип I).

а — принципиальная; *б* — эквивалентная.

Зависимость сопротивления шунтирующего участка делителя $R_{шв}$ от выходного напряжения выпрямителя определяется следующей приближенной формулой:

$$R_{шв} = (R_{шв\,макс} + R_в)\,\frac{I_n R_i}{U_в}.$$

При изменении напряжения выпрямителя в пределах $U_{макс} \div U_{мин}$ это сопротивление изменяется от $(R_{шв\,макс} + R_в) \times \times \frac{I_n R_i}{U_{макс}}$ до $(R_{шв\,макс} + R_в)\,\frac{I_n R_i}{U_{мин}}$. Разность этих сопротивлений определяет минимально необходимое сопротивление переменной части делителя.

Входное сопротивление рассматриваемой схемы

$$R_i = \frac{R_{шв}\,(R_{шв\,макс} - R_{шв} + R_в)}{R_{шв\,макс} + R_в} + R_д + R_и = R_{вг} + R_д + R_и.$$

При расчетном входном сопротивлении R_i необходимые величины сопротивлений $R_{вг}$ и $R_д$ определяются формулой

$$R_{вг}+R_д=R_i-R_и.$$

Изменение напряжения питания, компенсируемое соответствующей регулировкой „нуля“, приводит к изменению входного сопротивления омметра и появлению дополнительной погрешности измерений. Для того чтобы эта погрешность не была велика, желательно брать сопротивление $R_{вг}$ возможно меньшей величины, соответственно увеличивая сопротивление $R_д$. Однако следует учитывать, что при этом возрастает ток в цепи питания, который не должен превосходить определенного для каждого выпрямителя значения.

Работа рассматриваемой схемы омметра не изменится, если в ней поменять местами источник питания и индикатор, оставив при этом без изменения сопротивления всех цепей, т. е. считая, что $R_в$ есть внутреннее сопротивление индикатора, а $R_и$ — источника питания, как это показано на фиг. 21,*б*. Эквивалентность схем фиг. 21,*а* и *б* легко доказать, определив величину тока, протекающего через индикатор, которая для обеих схем одинакова и равна:

$$I_x=\frac{U_в}{R_i+R_x}\cdot\frac{R_{шв}}{R_{шв\ макс}+R_в},$$

где R_i — входное сопротивление—также одинаково для рассматриваемых схем.

Отсюда следует, что по своим качественным показателям схема фиг. 21,*а* равноценна схеме омметра с балансной регулировкой „нуля“ фиг. 10. Для расчета омметра могут быть применены расчетные формулы § 7, если в них произвести замену $R_и$ на $R_в$, а $R_д$ на $R_д+R_и$.

Путем соответствующего расчета схемы омметра фиг. 21,*а* может быть достигнут оптимальный режим работы, при котором омметр будет иметь одинаковое входное сопротивление при выходных напряжениях выпрямителя $U_{макс}$ и $U_{мин}$. Оптимальный режим достигается при выборе в качестве расчетного напряжения

$$U_{макс}=U_{опт}=I_nR_i\left(1+\frac{U_{макс}}{U_{мин}}\right)>2I_nR_i.$$

При оптимальном режиме имеет место отношение

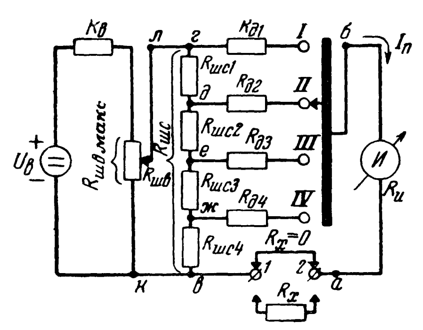
$$\frac{R_{шв\,макс}}{R_в} = \frac{U_{макс}}{U_{мин}}$$

(считая $R_{мин2} = 0$).

Максимально возможная величина дополнительной погрешности при оптимальном режиме работы определяется формулой

$$K_{д\,макс} = \frac{\left(\frac{U_{макс}}{U_{мин}} - 1\right)^2 I_п R_в}{4U_{макс}}.$$

На фиг. 22 приведена схема многопредельного омметра с плавной регулировкой напряжения питания. Здесь напряжение, снимаемое с плавного делителя, подается на ступенчатый делитель $R_{шс}$, с помощью которого обеспечивается необходимое напряжение при работе омметра на любом из его пределов.



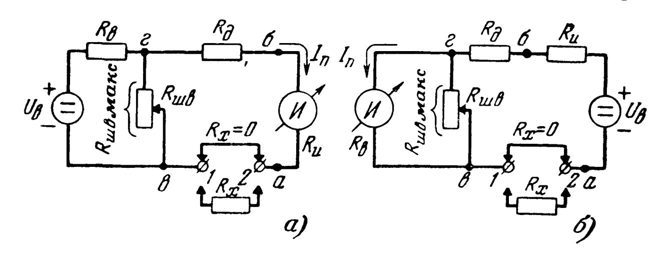
Фиг. 22. Схема многопредельного сетевого омметра с плавной регулировкой напряжения питания.

Особенностью данной схемы является то, что омметр имеет наибольшую дополнительную погрешность при пределе измерений *I* с наибольшим входным сопротивлением, так как на этом пределе измерений изменение сопротивления потенциометра $R_{шв}$ может заметно влиять на величину входного сопротивления омметра. При переходе к пределам измерений с меньшим входным сопротивлением влияние регулировочной цепи ослабляется, что уменьшает величину дополнительной погрешности.

При пределе измерений *I* напряжение питания омметра, как правило, достигает нескольких сотен вольт, вследствие чего добавочное сопротивление $R_{д1}$ значительно превышает сопротивление левой части схемы $R_{вг}$; поэтому дополнительная погрешность оказывается обычно весьма малой по сравнению с основной погрешностью омметра. Это позволяет в ряде случаев с целью уменьшения необходимого напряжения питания отказаться от расчета омметра в оп-

тимальном режиме работы и выбор напряжения питания производить из условия $U_{мин} > I_п R_i$.

Сетевой омметр с регулируемым напряжением питания может быть также осуществлен по схеме фиг. 23,*а*. Здесь регулировка „нуля" производится с помощью реостата

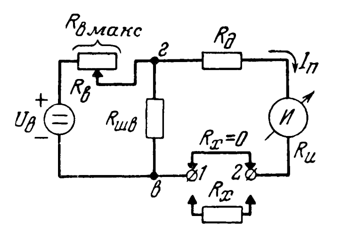


Фиг. 23. Схема сетевого омметра с регулируемым напряжением питания (тип II).

а — принципиальная; *б* — эквивалентная.

$R_{шв}$, включенного параллельно источнику питания и позволяющего перераспределять напряжение источника между сопротивлениями делителя $R_в$ и $R_{шв}$. По своим качественным показателям данная схема равноценна схеме омметра с параллельным включением регулятора „нуля" фиг. 9, что видно из эквивалентной схемы фиг. 23,*б*. Расчет омметра может производиться по формулам § 6, с учетом замечаний, приведенных выше для схемы фиг. 21,*а*. По точности измерений рассматриваемая схема омметра уступает схеме фиг. 21,*а*.

В качестве возможного варианта на фиг. 24 приведена схема омметра, в которой регулировка „нуля" производится путем изменения внутреннего сопротивления источника $R_в$, что достигается включением последовательно в цепь питания переменного сопротивления. По точности измерений эта схема примерно равноценна схеме омметра фиг. 23,*а*.



Фиг. 24. Схема сетевого омметра с регулируемым напряжением питания (тип III).

Для расширения пределов измерения в схеме омметра фиг. 23,*а* параллельно сопротивлению $R_{шв}$ включается ступенчатый делитель напряжения, а в схеме фиг. 24 ступенчатый делитель заменяет сопротивление $R_{шв}$.

Преимуществом омметров с регулируемым напряжением питания является то, что чувствительность их индикаторов может использоваться полностью Благодаря этому при одинаковом входном сопротивлении они могут работать при меньшем напряжении питания, чем омметры с регулируемой чувствительностью индикатора.

Недостатком омметров с регулируемым напряжением питания является то, что для получения малой погрешности измерений необходимо, чтобы сопротивления $R_{шв}$, $R_{в}$ и $R_{шс}$ были сравнительно малой величины; это приводит к возрастанию тока в цепи питания, который при прочих равных условиях обычно превосходит ток питания в схемах с регулируемой чувствительностью индикатора.

Принципиально установку „нуля" сетевого омметра можно производить путем плавного изменения переменного напряжения, подаваемого на выпрямитель. Такая регулировка осуществляется с помощью специальных типов автотрансформаторов, трансформаторов и реостатов. Подобные схемы омметров отличаются от рассмотренных выше схем лишь тем, что в них сопротивления $R_{в}$ и $R_{шв}$ берутся постоянными, а в многопредельных омметрах сопротивление $R_{шв}$ заменяется ступенчатым делителем напряжения.

17. РАСЧЕТ МНОГОПРЕДЕЛЬНОГО СЕТЕВОГО ОММЕТРА С РЕГУЛИРУЕМЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ ПИТАНИЯ

Пример 7. Рассчитать сетевой омметр по схеме фиг. 22 на основе исходных данных и данных предварительного расчета сетевого омметра из примера 6. Индикатор класса 2,5; $I_n = 100$ *мка*; $R_u = 800$ *ом*; предел измерений 1 *ком* $\div$ 10 *мгом*; число пределов $p = 4$; $N = 10$; $R_{i1} = 3$ *мгом*; $R_{i2} = 300$ *ком*; $R_{i3} = 30$ *ком*; $R_{i4} = 3$ *ком*; $K_{макс} = 15\%$; при $\frac{U_{макс}}{U_{мин}} = 1{,}5$ $K_{д\,макс} \leqslant 0{,}01$.

Порядок расчета приводится в сокращенной записи.

А. Расчет исходного (четвертого) предела измерений омметра ($R_{i4} = 3$ *ком*)

1. $U_{04} = I_n R_{i4} = 0{,}3$ *в*.

2. $R_{шс4} + R_{д4} = R_{i4} - R_u = 2\,200$ *ом*.

Выбираем $R_{шс4} = 200$ *ом*, а $R_{д4} = 2\,000$ *ом*.

Б. Расчет первого предела измерений омметра ($R_{i1} = 3$ *мгом*)

1. Так как $N = 10$, а $p = 4$, находим:

$$R_{шс} = R_{шс4} N^{p-1} = 200 \text{ ком};$$

2 $U_{01} = U_{04} \cdot N^{p-1} = 300$ *в.*

3. Принимаем $U_{мин} = 350$ *в.* Тогда

$$U_{макс} = 1{,}5 U_{мин} = 525 \text{ в.}$$

4. Из условия $R_{кл} \ll R_{i1}$ выбираем $R_{шв\ макс} = 150$ *ком.*

5. $R_в = R_{шв\ макс} \left(\dfrac{U_{мин}}{U_{01}} - 1 \right) = 25$ *ком.*

Сопротивление $R_в$ включает в себя внутреннее сопротивление источника питания.

6. Пределы изменений сопротивления шунтирующей части делителя напряжения

$$R_{шв\ макс} \div (R_{шв\ макс} + R_в) \frac{U_{01}}{U_{макс}} = 150 \div 100 \text{ ком.}$$

Следовательно, делитель напряжения $R_{шв\ макс}$ может быть составлен из постоянного сопротивления 100 *ком* и переменного потенциометра на 50 *ком.*

7. При изменении напряжения от $U_{мин}$ до $U_{макс}$ сопротивление левой части схемы между точками *к* и *л* меняется в пределах

$$R_{кл} = \frac{150 \cdot 25}{175} \div \frac{100 \cdot 75}{175} = 21{,}4 \div 42{,}8 \text{ ком.}$$

8. $R_{вг} = \dfrac{R_{шс} \cdot R_{кл}}{R_{шс} + R_{кл}} = 19{,}3 \div 35{,}2$ *ком.*

Принимаем за среднее значение $R_{вг} = 27$ *ком.*

9. $R_{д1} = R_{i1} - R_{вг} - R_и = 2\,972$ *ком* $\approx 2{,}97$ *мгом.*

10. Максимально возможная величина дополнительной погрешности

$$K_{д\ макс}\,\% = \frac{\Delta R_{вг}}{R_{i1}} \cdot 100 = \frac{35{,}2 - 19{,}3}{3\,000} \cdot 100 \approx 0{,}53\%.$$

В. Расчет второго предела измерений омметра ($R_{i2} = 300$ *ком*)

1. $R_{шс2} + R_{шс3} + R_{шс4} = \dfrac{R_{шс}}{N} = 20$ *ком.*

Отсюда $R_{шс1} = R_{шс} - \dfrac{R_{шс}}{N} = 180$ *ком.*

2. $R_{вд} = \dfrac{(R_{шс2} + R_{шс3} + R_{шс4})(R_{шс1} + R_{кл})}{R_{шс} + R_{кл}} = 18{,}2 \div 18{,}3$ *ком.*

3. $R_{д2} = R_{i2} - R_{вд} - R_и = 281$ *ком.*

4. Максимально возможная дополнительная погрешность

$$K_{д\ макс}\,\% = \frac{\Delta R_{вд}}{R_{i2}} \cdot 100 = \frac{18{,}3 - 18{,}2}{300} \cdot 100 = 0{,}033\%.$$

Г. Расчет третьего предела измерений омметра ($R_{i3} = 30$ *ком*)

1. $R_{шc3} + R_{шc4} = \frac{R_{шc}}{N^2} = 2$ *ком.*

Отсюда

$$R_{шc2} = R_{шc} - R_{шc1} - (R_{шc3} + R_{шc4}) = 18 \text{ ком}$$

и

$$R_{шc3} = (R_{шc3} + R_{шc4}) - R_{шc4} = 1{,}8 \text{ ком} = 1\,800 \text{ ом}.$$

2. $R_{вe} = \frac{(R_{шc3} + R_{шc4})(R_{шc1} + R_{шc2} + R_{кл})}{R_{шc} + R_{кл}} = 1\,980$ *ом.*

3. $R_{д3} = R_{i3} - R_{вe} - R_{и} = 27{,}2$ *ком.*

18. СХЕМЫ ПИТАНИЯ СЕТЕВЫХ ОММЕТРОВ

Сетевые омметры, питающиеся от сети переменного тока, содержат ламповые или селеновые выпрямители, позволяющие получить постоянное напряжение необходимой величины.

В настоящем параграфе рассматриваются лишь общие вопросы, связанные с определением исходных данных и выбором схемы выпрямителя.

На основании расчета схемы омметра определяются исходные данные для расчета выпрямителя: допустимые значения выпрямленного напряжения $U_{макс} \div U_{мин}$ и сопротивление нагрузки выпрямителя, которое представляет собой общее сопротивление цепи, состоящей из сопротивления $R_в$, включающего в себя внутреннее сопротивление выпрямителя, и сопротивления делителя $R_{шв}$ с подключенной параллельно ему цепью.

Пределы изменения выпрямленного напряжения питания определяются возможными колебаниями переменного напряжения сети и схемой выпрямителя.

Выпрямленное напряжение может поддерживаться неизменным при работе выпрямителя с автотрансформатором или трансформатором, допускающим плавную регулировку коэффициента трансформации. В подобных схемах находят применение широко распространенные лабораторные автотрансформаторы типов ЛАТР-1 и ЛАТР-2.

В сетевых омметрах постоянство выпрямленного напряжения может обеспечиваться феррорезонансными, электронными или ионными стабилизаторами. При хорошей работе стабилизатора как медленные, так и быстрые изменения напряжения сети будут мало влиять на результаты измерения. Если же сетевой омметр не содержит

стабилизатора, то результаты измерения будут правильны лишь при условии, если после установки „нуля“ в процессе измерения сохраняется постоянство питающего напряжения.

Если схема питания не содержит регулировочных или стабилизирующих устройств, изменение выпрямленного напряжения можно с некоторым приближением считать пропорциональным изменению переменного напряжения сети. При этом расчет выпрямителя обычно производится на определенную величину постоянного напряжения $U_в$, соответствующую, как правило, номинальному напряжению сети переменного тока, равному 110, 127 или 220 *в*. Так, например, если при номинальном напряжении сети 220 *в* возможны колебания переменного напряжения в пределах 240 ÷ 160 *в*, а величина выпрямленного напряжения (по данным примера 7) при этом меняется от 525 до 350 *в* $\left(\text{при } \frac{U_{макс}}{U_{мин}} = 1{,}5\right)$, расчетное значение напряжения $U_в$ определяется из соотношения

$$\frac{U_в}{U_{макс}} = \frac{220}{240},$$

откуда находим, что $U_в = 480$ *в*.

Сопротивление нагрузки выпрямителя может изменяться в некоторых пределах в зависимости от положения ручки регулятора „нуля“, выбранного предела измерений и величины измеряемого сопротивления R_x. За расчетное сопротивление нагрузки следует брать одно из промежуточных значений сопротивления, подключенного к выпрямителю при расчетном напряжении $U_в$.

В качестве примера определим величину сопротивления нагрузки $R_н$ для омметра, работающего по схеме фиг. 22, расчет которого был произведен в примере 7.

Прежде всего найдем сопротивление шунтирующего участка делителя, соответствующее $U_в = 480$ *в*:

$$R_{шв} = (R_{шв\ макс} + R_в)\frac{U_{01}}{U_в} = 175 \cdot \frac{300}{480} = 109 \text{ ком}.$$

Наибольшую величину сопротивление нагрузки получает при $R_x = \infty$. В этом случае параллельно сопротивлению $R_{шв}$ будет включено сопротивление делителя $R_{шс} = 200$ *ком*. Очевидно, что

$$R_{н\ макс} = R_в + (R_{шв\ макс} - R_{шв}) + \frac{R_{шв} R_{шс}}{R_{шв} + R_{шс}} =$$

$$= 25 + 41 + 70{,}5 = 136{,}5 \text{ ком}.$$

Наименьшее значение сопротивление нагрузки имеет при использовании предела измерений *I* при $R_x = 0$. Тогда параллельно сопротивлениям $R_{шв}$ и $R_{шс}$ включается сопротивление $R_{д1} + R_и \approx 2\,973$ *ком*. Следовательно,

$$R_{н\ мин} = 25 + 41 + \frac{70{,}5 \cdot 2\,973}{3\,043{,}5} = 66 + 68{,}8 = 134{,}8\ ком.$$

Учитывая незначительное изменение сопротивления нагрузки в процессе работы, можно принять за расчетное сопротивление $R_н = 136$ *ком*. Тогда выпрямленный ток, протекающий через нагрузку

$$I_в = \frac{U_в}{R_н} = \frac{480}{136\,000} = 0{,}0035\ а = 3{,}5\ ма.$$

При выходных напряжениях выпрямителя, отличных от $U_в = 480$ *в*, сопротивление нагрузки несколько меняется. Однако расчет, аналогичный произведенному выше, показывает, что величина тока $I_в$ при этом меняется мало, отклоняясь от вычисленного нами значения не более чем на 0,3 *ма*.

Величина выпрямленного тока, нагружающего выпрямитель, обычно не превышает нескольких миллиампер. Поэтому для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения в сетевых омметрах применяются простейшие фильтры, состоящие из одного конденсатора емкостью порядка 1 *мкф*, включенного параллельно нагрузке.

Выпрямители сетевых омметров по способу подключения к сети переменного тока бывают трех типов: с автотрансформаторами, с силовыми трансформаторами и бестрансформаторные. Выпрямители с автотрансформаторами применяются сравнительно редко, так как они дают выпрямленное напряжение, мало отличающееся по величине от эффективного значения переменного напряжения сети. Более широкое применение получили выпрямители с силовыми трансформаторами, которые позволяют легко получить выпрямленное напряжение любой практически необходимой величины.

Простейшей схемой лампового выпрямителя с силовым трансформатором является однополупериодная схема. Для работы омметра наличие небольших пульсаций выпрямленного напряжения мало существенно, поэтому эта простейшая схема находит широкое применение. Она, в частности, имеет преимущества перед известной двухполупериодной схемой на кенотроне, применяемой для питания различных радиоустройств. Хотя последняя схема дает выпрямленное напряжение с малыми пульсациями, однако величина этого напряжения не превышает половины амплитуды перемен-

ного напряжения на полной вторичной обмотке трансформатора, которая к тому же должна иметь отвод от средней точки.

В выпрямителях, работающих с селеновыми столбиками, помимо однополупериодной схемы часто применяется двухполупериодная мостовая схема. Эта схема позволяет наряду с малыми пульсациями получить выпрямленное напряжение значительной величины.

Питание сетевых омметров иногда производится от выпрямителей бестрансформаторного типа. Отсутствие силового трансформатора значительно упрощает конструкцию выпрямителя. Однако применение таких выпрямителей возможно лишь в том случае, когда необходимая величина выпрямленного напряжения меньше амплитуды переменного напряжения питающей сети. Для повышения выпрямленного напряжения применяются специальные схемы умножителей напряжения — удвоителей, утроителей и т. д.

При эксплуатации бестрансформаторных омметров, а также омметров с автотрансформаторами следует учитывать, что один полюс, питающий сети, обычно заземлен. Поэтому необходимо, чтобы измеряемое сопротивление не было связано с землей; в противном случае часть схемы омметра может оказаться закороченной, что приведет к неправильному отсчету.

Питание нитей накала ламп выпрямителей бестрансформаторного типа может осуществляться от отдельного небольшого понижающего трансформатора (в этом случае все нити накала обычно соединяются параллельно) или непосредственно от сети через гасящее сопротивление (при этом нити накала всех ламп соединяются последовательно). Последний способ удобен лишь при применении ламп с высоковольтным накалом.

Схема бестрансформаторного выпрямителя упрощается при работе с селеновыми элементами, так как при этом отпадают все затруднения, связанные с питанием цепей накала. Однако следует учитывать, что при прочих равных условиях замена ламп селеновыми столбиками приводит к некоторому уменьшению величины выпрямленного напряжения, так как сопротивление селенового столбика обратному току значительно меньше обратного сопротивления электронной лампы. Кроме того, селеновые столбики должны выдерживать обратное напряжение, примерно равное (в зависимости от схемы включения) удвоенной или утроенной амплитуде переменного напряжения сети. При

выборе ламп и расчете селеновых столбиков для выпрямителей следует исходить из необходимого значения выпрямленного напряжения и соответствующего ему выпрямленного тока, определяемых при расчете омметра.

Малая величина выпрямленного тока позволяет использовать в омметрах, помимо специальных выпрямительных ламп, маломощные лампы других типов. Многоэлектродные лампы, содержащие одну или несколько сеток, применяются, как правило, в диодном включении, для чего их сетки соединяются с анодом. Большинство приемно-усилительных ламп может быть применено в схемах выпрямителей, в которых выпрямленное напряжение не превышает 160 *в* при токе не свыше 10 *ма*. При работе с лампой типа 6Н7С допустимая величина выпрямленного напряжения повышается до 400 *в* при токе до 50 — 70 *ма*.

Если электронные лампы или селеновые столбики работают в режиме, когда выпрямленный ток равен нескольким десяткам миллиампер, они имеют внутреннее сопротивление порядка сотен ом. Если же они работают при малом токе на нижнем загибе их вольтамперной характеристики (что имеет место в омметрах), то их внутреннее сопротивление возрастает до нескольких тысяч ом. Однако в ряде случаев величина их внутреннего сопротивления оказывается все же значительно меньше сопротивления нагрузки, и тогда ею можно пренебречь.

Глава шестая

ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОММЕТРОВ

19. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И РАСЧЕТ СХЕМЫ ОММЕТРА

Для расчета омметра в общем случае необходимо знать:

а) пределы измерений омметра и допустимую основную погрешность измерений;

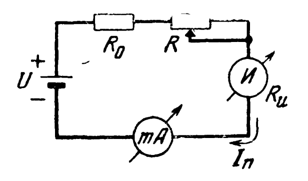
б) класс точности и параметры индикатора;

в) тип источника питания, возможные пределы изменения даваемого им напряжения и допустимую дополнительную погрешность измерений.

Весьма важным вопросом при разработке конструкции омметра является выбор его индикатора.

В качестве индикаторов омметров радиолюбители могут использовать любые приборы магнитоэлектрической системы, в том числе и индикаторы от вольтметров и амперметров постоянного тока, ламповых и купроксных вольтметров, термоэлектрических приборов и т. п.

В омметрах, работающих по последовательной схеме и предназначенных для измерения сопротивлений средних и больших величин, желательно применение высокочувствительных индикаторов с малым током полного отклонения I_n. Такие индикаторы на 50 и 100 *мка* выпускаются отечественной промышленностью. Чем меньше ток I_n, тем меньшее напряжение питания требует омметр при данном входном сопротивлении R_i. Кроме того, малый ток I_n приводит к уменьшению тока, потребляемого от источника питания, что увеличивает срок службы элементов в батарейных омметрах.



Фиг. 25. Схема для определения тока полного отклонения индикатора I_n.

Второй величиной, на которую необходимо обращать внимание при выборе индикатора, является падение напряжения $I_nR_и$, необходимое для отклонения стрелки на всю шкалу. При прочих равных условиях меньшая величина $I_nR_и$ в ряде схем омметров приводит к уменьшению дополнительной погрешности, связанной с изменением напряжения питания.

При расчете и изготовлении омметра могут возникнуть затруднения в определении технических данных индикатора I_n и $R_и$, особенно при использовании индикатора неизвестного типа[1].

Определение тока полного отклонения индикатора I_n наиболее просто может быть произведено по схеме фиг. 25. При помощи переменного сопротивления R в цепи, питаемой от источника постоянного напряжения U, устанавливают ток I_n, определяемый по полному отклонению стрелки испытуемого индикатора *И* и отсчитываемый по шкале включенного последовательно в цепь образцового миллиамперметра (или микроамперметра) *mA*. Сопротивление R_0 служит для ограничения тока в цепи, если переменное

---

[1] Технические данные некоторых индикаторов магнитоэлектрической системы, выпускаемых отечественной промышленностью, приведены на 2-й и 3-й страницах обложки.

сопротивление R окажется случайно закороченным. При отсутствии образцового миллиамперметра ток I_n может быть определен как частное от деления напряжения U, измеренного вольтметром, на сопротивление цепи $R_0 + R + R_u$, в свою очередь измеренное омметром при отключенном источнике питания.

Если испытуемый индикатор имеет равномерную шкалу, проградуированную в любых единицах и разбитую на α_n делений, то его ток I_n может быть определен и без переменного сопротивления R. В данном случае величина R_0 подбирается такой, чтобы стрелка индикатора находилась в пределах второй половины шкалы. При этом в цепи индикатора протекает некоторый ток I_0, измеряемый образцовым миллиамперметром и вызывающий отклонение стрелки на α_0 делений. Исходя из очевидного равенства $\frac{I_n}{I_0} = \frac{\alpha_n}{\alpha_0}$, можно определить ток

$$I_n = I_0 \frac{\alpha_n}{\alpha_0}.$$

Сопротивление индикатора R_u может быть замерено с помощью какого-либо омметра, имеющего необходимый предел измерений. При проверке высокочувствительных индикаторов нужно соблюдать осторожность, так как большой ток омметра может повредить рамку индикатора. Если для измерения R_u используется многопредельный батарейный омметр, измерение следует начинать с наивысшего предела, на котором ток в цепи питания омметра наименьший. Переход на другие пределы допускается лишь в том случае, если это не вызывает ухода стрелки индикатора за пределы его шкалы.

Для измерения сопротивления R_u высокочувствительных индикаторов могут быть также применены схемы фиг. 26, предложенные радиолюбителем С. Марон[1]. В этих схемах с помощью потенциометра $R_ш$ (схема фиг. 26,*а*) или реостата R (схема фиг. 26,*б*) добиваются отклонения стрелки индикатора на всю шкалу. Затем в цепь включают сопротивление известной величины R_0, которое желательно брать соизмеримым с сопротивлением индикатора R_u. Ток через индикатор уменьшается до значения I_0. Сопротивле-

---

[1] С. Марон, Измерение внутреннего сопротивления прибора, „Радио", 1952, № 9, стр. 54—55.

ние индикатора определяется по приближенным формулам

$$R_и = \frac{I_0}{I_n - I_0} R_0 \text{ или } R_и = \frac{\alpha_0}{\alpha_n - \alpha_0} R_0 \text{ (для схемы фиг. 26,}a\text{)}$$

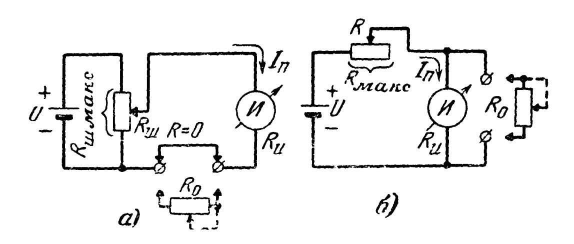
и

$$R_и = \frac{I_n - I_0}{I_0} R_0 \text{ или } R_и = \frac{\alpha_n - \alpha_0}{\alpha_0} R_0 \text{ (для схемы фиг. 26,}б\text{),}$$

которые дают достаточно точные результаты только при выполнении условий

$$R_ш \ll R_и \text{ или } R \gg R_и.$$

Желательно, чтобы сопротивления $R_ш$ и R отличались от сопротивления индикатора $R_и$ не менее чем в 50 раз.



Фиг. 26. Схемы измерения сопротивления рамок высокочувствительных индикаторов.
а — с потенциометром; *б* — с реостатом.

В качестве сопротивления R_0 удобно применить переменное сопротивление, величину которого изменяют так, чтобы стрелка индикатора отклонилась до середины шкалы. При этом $R_и = R_0$, а величину R_0 можно замерить с помощью какого-либо омметра, не прибегая к расчету.

Питание рассмотренных схем может производиться от любого сухого элемента или аккумулятора.

Рассмотрим вопрос о выборе источника питания омметра.

Ориентировочно минимально необходимая величина напряжения питания омметра может быть определена по формуле

$$U_{мин} = I_n R_{i1},$$

где R_{i1} — наибольшее расчетное входное сопротивление омметра.

Исходя из значения $U_{мин}$ следует выбрать тип источника питания. Если напряжение $U_{мин}$ не превышает нескольких десятков вольт, то наиболее рационально применить в омметре батарейное питание, так как подобный омметр работоспособен в самых разнообразных условиях эксплуатации. При большом напряжении $U_{мин}$ (свыше 20—30 *в*) и наличии питающей сети целесообразно применять сетевые омметры. В качестве возможного варианта может быть предложено питание омметра от низковольтной батареи большой емкости через вибропреобразователь, позволяющий получить выпрямленное напряжение порядка нескольких сотен вольт.

При расчете омметра задаются допустимой величиной изменения напряжения питания, которая характеризуется коэффициентом $\varepsilon_{макс}$ или отношением $\frac{U_{макс}}{U_{мин}}$. Чем меньше эти значения, тем меньшим будет максимальное напряжение, необходимое для работы омметра. Для батарейного омметра это приводит к уменьшению необходимого числа элементов батареи питания.

При расчете сетевого омметра отношение $\frac{U_{макс}}{U_{мин}}$ задается, как указывалось выше; в зависимости от возможных изменений напряжения питающей сети и схемы выпрямителя. Это отношение может быть снижено до значения, весьма близкого к единице ($1{,}02 \div 1{,}05$), если выпрямитель омметра имеет стабилизирующее устройство, обеспечивающее малую зависимость выпрямленного напряжения от изменения напряжения сети.

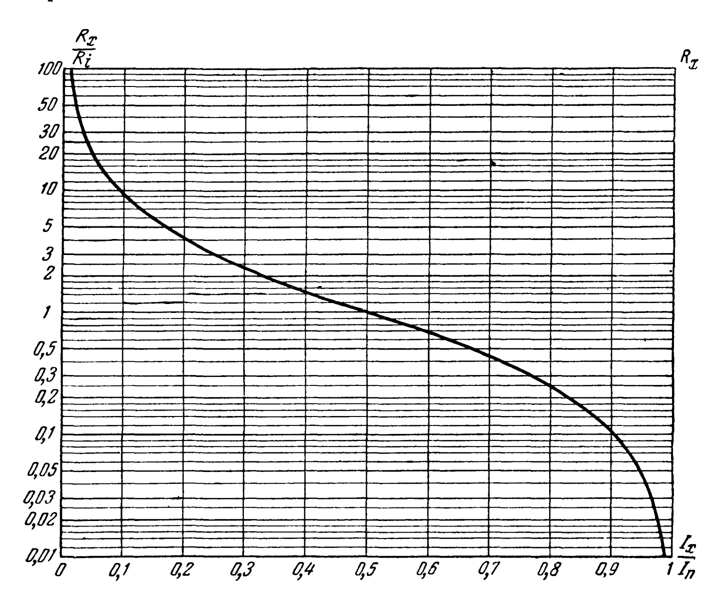
В батарейных омметрах изменение напряжения питания, обусловленное разрядом батареи, зависит от емкости батареи, предела измерений и чувствительности индикатора. Разряд батареи питания ускоряется при уменьшении входного сопротивления омметра и увеличении тока полного отклонения I_n. При применении высокочувствительных индикаторов на $50 \div 100$ *мка* и входном сопротивлении $R_i > 1\,000$ *ом* можно брать $\frac{U_{макс}}{U_{мин}} = 1{,}2 \div 1{,}3$. В остальных случаях это отношение выбирается порядка 1,5.

После выбора и определения исходных данных производится расчет схемы омметра в порядке, аналогичном рассмотренным выше примерам.

20. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ШКАЛЫ ОММЕТРА

При изготовлении омметра шкала примененного в нем индикатора заменяется новой шкалой, проградуированной в значениях измеряемых сопротивлений R_x.

Положение каждого деления на шкале омметра полностью определяется отношением $\frac{R_x}{R_i}$, что видно из формулы (3), справедливой для всех последовательных схем омметров.



Фиг. 27. Градуировочная кривая последовательных схем омметров.

Зависимость, выражаемая этой формулой, в графическом виде представлена на фиг. 27. Отношение $\frac{R_x}{R_i}$ отложено по вертикальной оси в логарифмическом масштабе, который позволяет исследовать характер градуировки шкалы омметра как при малых, так и больших значениях $\frac{R_x}{R_i}$. Расположенная с правой стороны графика ось R_x может быть заполнена отметками значений R_x, соответ-

ствующими данным отношениям $\frac{R_x}{R_i}$ при известном входном сопротивлении R_i.

Ниже приводится рассчитанная по формуле (3) градуировочная таблица (табл. 1), которая может быть использована для точного построения шкалы омметров, работающих по последовательной схеме.

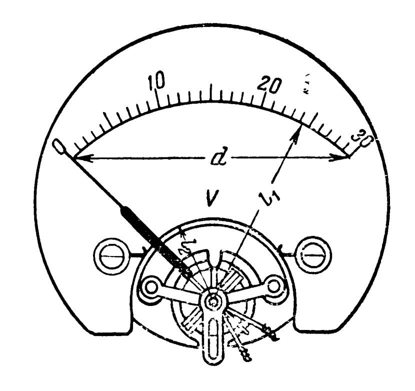
Таблица 1

$\frac{R_x}{R_i}$	$\frac{I_x}{I_n}$	$\frac{R_x}{R_i}$	$\frac{I_x}{I_n}$	$\frac{R_x}{R_i}$	$\frac{I_x}{I_n}$	$\frac{R_x}{R_i}$	$\frac{I_x}{I_n}$	$\frac{R_x}{R_i}$	$\frac{I_x}{I_n}$
0	1,0	0,20	0,833	0,50	0,667	1,5	0,400	4,0	0,200
0,01	0,99	0,22	0,820	0,55	0,645	1,6	0,385	4,5	0,182
0,02	0,98	0,24	0,807	0,60	0,625	1,7	0,370	5	0,167
0,03	0,97	0,26	0,794	0,65	0,606	1,8	0,357	6	0,143
0,04	0,961	0,28	0,781	0,70	0,588	1,9	0,345	7	0,125
0,05	0,952	0,30	0,769	0,75	0,572	2,0	0,333	8	0,111
0,06	0,943	0,32	0,757	0,80	0,556	2,2	0,312	9	0,100
0,07	0,934	0,34	0,746	0,85	0,541	2,4	0,295	10	0,091
0,08	0,925	0,36	0,735	0,90	0,527	2,6	0,278	15	0,063
0,09	0,917	0,38	0,724	0,95	0,513	2,8	0,264	20	0,048
0,10	0,909	0,40	0,714	1,0	0,500	3,0	0,250	30	0,033
0,12	0,893	0,42	0,704	1,1	0,476	3,2	0,238	40	0,025
0,14	0,877	0,44	0,695	1,2	0,455	3,4	0,227	50	0,020
0,16	0,862	0,46	0,685	1,3	0,435	3,6	0,217	∞	0
0,18	0,848	0,48	0,676	1,4	0,417	3,8	0,208	—	—

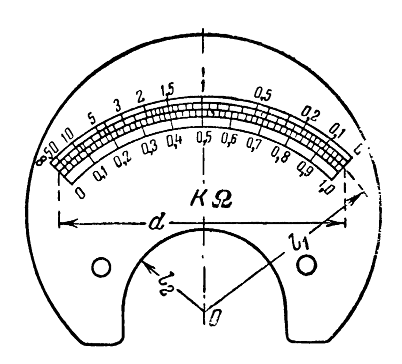
Для построения новой шкалы измерительный механизм индикатора осторожно вынимается из кожуха. С помощью циркуля и линейки определяют радиус кривизны дуги шкалы l_1 путем измерения расстояния между осью вращения стрелки и одной из точек дуги, как это показано на фиг. 28. Таким же образом измеряют радиус кривизны нижнего выреза шкалы l_2 и расстояние между концами дуги d.

Затем старая шкала отделяется от измерительного механизма. На листе белой плотной бумаги, обводя старую шкалу, наносят карандашом контур новой шкалы, на котором необходимо точно отметить точки крепления шкалы к механизму. На оси симметрии шкалы на расстоянии l_2 от нижнего выреза находится точка O, из которой циркулем радиусом l_1 и с хордой d строится дуга, как это показано на фиг. 29.

С одной стороны дуги (обычно внутренней) наносится карандашом вспомогательная равномерная шкала $\frac{I_x}{I_n}$ с отметками от 0 до 1 через каждые 0,1. Число делений шкалы зависит от длины дуги и обычно берется равным 100, 50 или 20. По другую сторону дуги вначале карандашом, а затем тушью наносятся значения R_x. Положе-



Фиг. 28. Определение основных размеров шкалы омметра по старой шкале индикатора.



Фиг. 29. Построение шкалы последовательной схемы омметра.

ние делений определяется по табл. 1 или графику фиг. 27. При этом для ограничения длины коротких и длинных черточек из центра *O* могут быть проведены карандашом вспомогательные дуги.

Крайние значащие деления, наносимые на шкалу омметра и определяющие общий предел измерений, зависят от размера шкалы и класса точности индикатора. Индикаторы более высокой точности имеют, как правило, и бóльших размеров шкалу. Ориентировочно можно считать, что при работе омметра с индикаторами классов 0,2 и 0,5, которые имеют зеркальную систему отсчета, крайние деления на шкале омметра должны соответствовать сопротивлениям $\frac{R_i}{100}$ и 100 R_i. При работе с индикаторами классов 1,0 и 1,5 крайние деления шкалы ограничиваются значениями $\frac{R_i}{50}$ и 50 R_i, а при индикаторах класса 2,5 — значениями $\frac{R_i}{20}$ и 20 R_i.

Новая шкала омметра наклеивается на старую шкалу индикатора и прикрепляется к измерительному механизму.

Внешний вид шкалы омметра, выполненной для входного сопротивления $R_i = 1$ *ком* при индикаторе класса 1,5, со всеми вспомогательными линиями и отметками, необходимыми при ее построении, показан на фиг. 29.

21. ПОДБОР ДЕТАЛЕЙ И МОНТАЖ ОММЕТРА

При изготовлении омметра может оказаться затруднительным подобрать сопротивления, соответствующие расчетным величинам. Несоответствие величины примененного в омметре сопротивления ее расчетному значению может привести к возрастанию погрешности измерений или к изменению технических данных омметра.

Все высокоомные сопротивления (больше 5—10 *ком*) берутся, как правило, заводского изготовления, непроволочные. Их величину необходимо проверить с помощью омметра или, если есть возможность, с помощью измерительного моста. Нужную величину сопротивления часто оказывается легче подобрать, если составлять сопротивление из двух или большего числа последовательно соединенных сопротивлений.

Сопротивления небольшой величины обычно изготовляются проволочными. Для этой цели применяется проволока из константана, манганина, никелина или других материалов с большим удельным сопротивлением. Диаметр проволоки выбирается тем бóльшим, чем меньше величина электрического сопротивления.

Проволочные сопротивления наматываются на каркас из эбонита, текстолита, сухого дерева или другого изоляционного материала или подключаются в виде отрезка проволоки между соответствующими точками схемы омметра.

В высоковольтных сетевых омметрах через сопротивления, включенные параллельно источнику питания, иногда проходит значительный ток. Поэтому при расчете сетевого омметра следует подсчитывать мощность рассеяния на отдельных участках делителя напряжения по формуле $P = I^2R$ и в соответствии с полученным значением выбирать тип сопротивления или диаметр используемой в нем проволоки.

Входное сопротивление изготовленного омметра может быть проверено с помощью другого омметра. Для этого последний присоединяют к входным зажимам R_x испытуемого омметра, у которого источник питания должен быть отключен, а зажимы питания соединены между собой накоротко.

Подгонка нужной величины входного сопротивления, омметра может быть легко произведена при наличии магазина сопротивлений или постоянного сопротивления, равного расчетному значению R_i. Элементы схемы омметра регулируются таким образом, чтобы при подключении к входным зажимам сопротивления, равного по величине входному, стрелка индикатора (после предварительной установки „нуля") отклонялась точно до середины шкалы.

Для однопредельных омметров точное равенство входного сопротивления расчетному значению существенной роли не играет, так как шкала омметра может быть проградуирована для действительного значения R_i, определенного практически.

В многопредельных омметрах, где одна и та же шкала, как правило, используется для нескольких пределов измерений, нужно стремиться к возможно более точному соответствию действительного входного сопротивления его расчетному значению при каждом пределе измерений. Если все сопротивления омметра (добавочные и шунтирующие) будут иметь расчетные величины, то установка „нуля", произведенная на одном пределе, будет сохраняться при переходе на другие пределы измерений.

Размещение деталей омметра должно быть сообразовано с габаритами корпуса, расположением органов управления и источников питания, а также с удобствами монтажа и доступа к деталям.

При изготовлении высокоомных омметров с входным сопротивлением порядка 1 *мгом* и выше необходимо обращать внимание на качество изоляции отдельных элементов схемы. Входные зажимы или гнезда таких приборов желательно располагать по возможности дальше друг от друга, а монтаж деталей следует производить на панели из высококачественного изоляционного материала, например текстолита.

Типы передних панелей многопредельных омметров были показаны на фиг. 16 и 17. В омметре фиг. 16 переключение пределов производится с помощью переклю-

чателя, а для облегчения установки „нуля“ используется кнопка. В омметре фиг. 17 измеряемое сопротивление включается с помощью измерительных проводов между гнездом „общ“ и одним из остальных гнезд в зависимости от используемого предела измерений. Величина R_x определяется как произведение показаний, отсчитываемых по шкале индикатора, и множителя, указанного около используемого гнезда. При установке „нуля“ гнездо „общ“ соединяется накоротко с гнездом используемого предела.

При конструировании батарейных омметров желательно элементы питания располагать в отдельном отсеке, изолированном глухой перегородкой от остальной части схемы. В противном случае пары, выделяющиеся при работе элементов, будут действовать разрушающе на монтаж.

Высоковольтные батареи питания обычно не монтируются внутри корпуса прибора. Их соединяют последовательно с измеряемым сопротивлением при работе на соответствующих пределах измерений (например, при пределе измерения *I* омметра, фиг. 14).

Многопредельный омметр часто представляет собой составную часть комбинированного измерительного прибора.

В таком приборе для различных измерений используется один и тот же индикатор, одна из шкал которого градуируется в значениях R_x. Типовые конструкции подобных приборов приведены на фиг. 30 и 31.

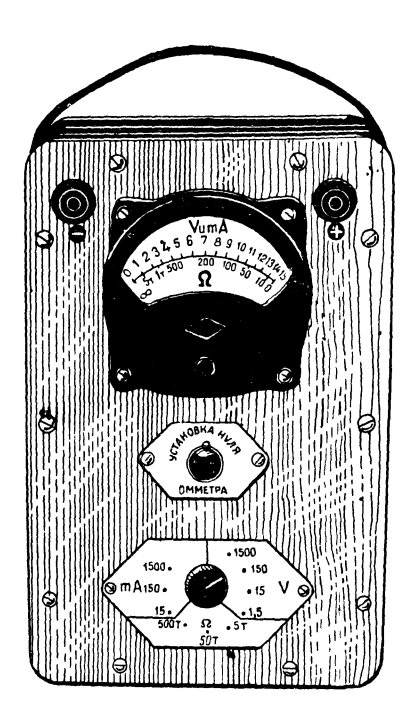
На фиг. 30 показан внешний вид авометра типа АВО-3, предназначенного для измерений постоянных токов, напряжений и сопротивлений. При всех этих измерениях используются общие зажимы. Род работы прибора и предел измерения определяются переключателем, имеющим 10 положений.

При работе омметра используются три положения переключателя: „5т“, „50т“ и „500т“, соответствующие максимальным величинам измеряемых сопротивлений 5, 50 и 500 *ком*. Шкала омметра проградуирована для предела 5 *ком* ($R_i = 200$ *ом*); на других пределах отсчет по шкале индикатора умножается на 10 или 100.

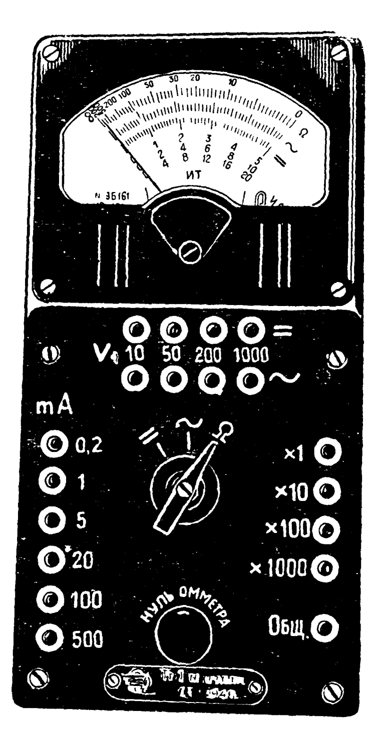
Питание омметра на пределе „5т“ производится от элемента с максимальным напряжением 1,5 *в*, который помещается в отдельном отсеке с задней стороны прибора. На пределах „50т“ и 500т“ для питания омметра

используются внешние батареи напряжением соответственно 10—20 и 100—200 *в*, подключаемые последовательно с R_x к входным зажимам.

На фиг. 31 показан внешний вид авометра типа ТТ-1. Для измерения сопротивлений переключатель рода работы прибора устанавливается в положении „Ω“. Измеряемое



Фиг. 30. Авометр типа АВО-3.



Фиг. 31. Авометр типа ТТ-1.

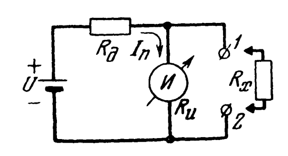
сопротивление подключается с помощью измерительных проводов между гнездом „общ“ и одним из четырех гнезд, около которых выгравированы множители к шкале омметра.

Питание схемы омметра производится от четырех элементов типа ФБС-0,25, расположенных внутри корпуса вместе с остальными деталями схемы, что является недостатком прибора.

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ И КОМБИНИРОВАННЫЕ СХЕМЫ ОММЕТРОВ

22. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СХЕМ ОММЕТРОВ

В радиолюбительской практике для измерения малых сопротивлений находят применение омметры, работающие по параллельной схеме. Их основное достоинство — возможность получения малого входного сопротивления при сравнительно небольшом потребляемом от источника питания токе. Простейшая схема такого омметра представлена на фиг. 32. Она отличается от аналогичной последовательной схемы фиг. 2 лишь способом включения измеряемого сопротивления.



Фиг. 32. Простейшая параллельная схема омметра.

В параллельных схемах измеряемое сопротивление R_x включается параллельно индикатору. Поэтому при разомкнутых зажимах *1* и *2* ($R_x = \infty$) через индикатор проходит наибольший ток, который должен быть равен току полного отклонения $I_п$.

Для получения необходимой величины тока добавочное сопротивление выбирается равным

$$R_д = \frac{U}{I_п} - R_и.$$

Вычисленная величина $R_д$ включает в себя внутреннее сопротивление источника питания. Если последним нельзя пренебречь, то действительную величину $R_д$ соответственно уменьшают относительно вычисленного значения.

При подключении к омметру сопротивления R_x последнее шунтирует индикатор, уменьшая угол отклонения его стрелки. При короткозамкнутых входных зажимах ($R_x = 0$) индикатор закорачивается, и ток через него равен нулю.

По аналогии с последовательной схемой *входным сопротивлением параллельной схемы омметра* R_i называют

сопротивление омметра между зажимами *1* и *2*. Для простейшей схемы

$$R_i = \frac{R_u R_\partial}{R_u + R_\partial}.$$

Выясним характер шкалы омметра.

При $R_x = \infty$ через индикатор протекает наибольший ток

$$I_n = \frac{U}{R_u + R_\partial}.$$

При подключении к входным зажимам сопротивления R_x ток через индикатор уменьшается до значения

$$I_x = \frac{U}{R_\partial + \dfrac{R_u R_x}{R_u + R_x}} \cdot \frac{R_x}{R_u + R_x} = \frac{U R_x}{(R_u + R_\partial) R_x + R_u R_\partial} =$$

$$= \frac{U}{R_u + R_\partial} \cdot \frac{R_x}{R_x + \dfrac{R_u R_\partial}{R_u + R_\partial}} = \frac{U}{R_u + R_\partial} \cdot \frac{R_x}{R_x + R_i}.$$

Отношение этих токов дает формулу, определяющую градуировку шкалы параллельной схемы омметра:

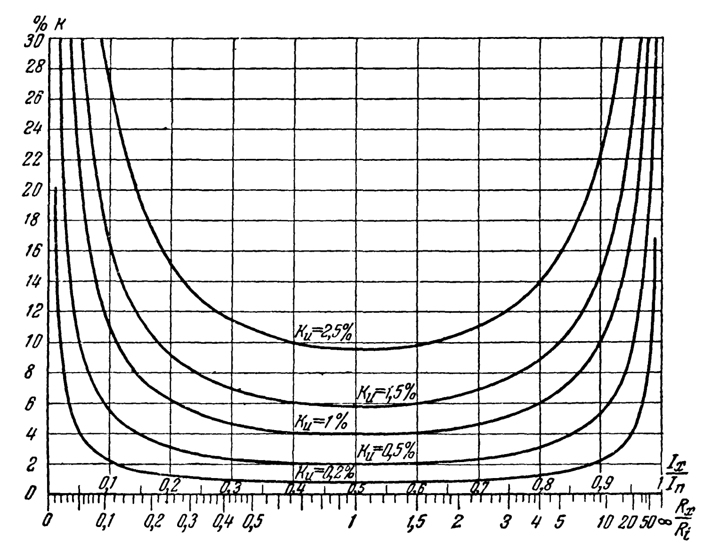
$$\frac{I_x}{I_n} = \frac{R_x}{R_x + R_i} = \frac{\dfrac{R_x}{R_i}}{1 + \dfrac{R_x}{R_i}}. \tag{62}$$

Внизу на фиг. 33 изображена развернутая шкала параллельной схемы омметра, выполненная в относительных единицах $\frac{R_x}{R_i}$. Очевидно, что эта шкала будет справедлива для омметра с любым входным сопротивлением при условии умножения отсчета по шкале на соответствующий множитель. Например, при $R_i = 10$ *ом* показания омметра (в омах) нужно умножать на 10, при $R_i = 1$ *ком* отсчет по шкале производится в килоомах и т. д.

Обычно добавочное сопротивление омметра R_∂ не менее чем в $5 \div 20$ раз превышает сопротивление индикатора R_u. Поэтому входное сопротивление параллельной схемы в основном определяется сопротивлением индика-

тора и при достаточно большой величине $R_д$ приближенно можно считать $R_i \approx R_и$.

Повышение напряжения питания приводит к увеличению необходимой величины $R_д$. Входное же сопротивление омметра, а следовательно, и общий предел измерений при этом меняются незначительно. Отсюда следует одно из



Фиг. 33. Развернутая шкала параллельной схемы омметра и график основной погрешности.

важнейших свойств такого омметра: малая зависимость предела измерений от напряжения питания.

Шкала омметра, собранного по параллельной схеме, носит точно такой же характер, как и шкала омметра, собранного по последовательной схеме, но расположена она в обратном направлении. При одинаковом входном сопротивлении одна шкала является зеркальным отображением другой шкалы.

Основная относительная погрешность омметра, работающего по параллельной схеме, количественно определяется в зависимости от класса точности и положения стрелки индикатора графиком фиг. 33 или формулой

$$K\% = \frac{K_и\%}{\frac{I_x}{I_n}\left(1 - \frac{I_x}{I_n} - K_и\right)}.$$

Условия работы омметра могут отличаться от нормальных условий, при которых производилась его градуировка. Это вызывает появление дополнительной погрешности измерений. Так, например, если в простейшей схеме фиг. 32 напряжение питания отличается от расчетного напряжения U, то при $R_x = \infty$ стрелка индикатора не будет устанавливаться на отметку ∞.

Устранить влияние напряжения питания на точность измерений можно, используя в омметре логометрический индикатор, как это сделано, например, в фабричном микроомметре типа М-246. В омметрах с обычными однорамочными индикаторами для повышения точности измерений в схему омметра вводится специальный регулятор „бесконечности".

Регулировка „бесконечности" заключается в том, что перед началом измерений при разомкнутых входных зажимах производятся проверка и установка стрелки индикатора в крайнее правое положение против деления ∞ на шкале омметра.

Иногда в омметрах установка „бесконечности" осуществляется с помощью магнитного шунта, позволяющего регулировать в некоторых пределах ток полного отклонения индикатора I_n в соответствии с величиной напряжения питания (см. § 4). При этом входное сопротивление омметра R_i остается неизменным, вследствие чего изменение в определенных пределах напряжения питания не вызывает появления дополнительной погрешности. Подобная схема применена в омметрах типа М-471.

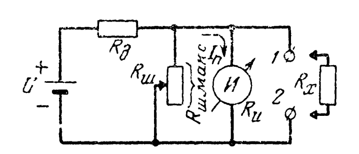
В комбинированных измерительных приборах, для которых регулировка чувствительности индикатора при помощи магнитного шунта недопустима, применяются схемы омметров с электрическими регуляторами „бесконечности". Такими регуляторами служат реостаты или потенциометры, которые в батарейных омметрах включаются либо параллельно индикатору, либо последовательно в цепь питания.

23. ОММЕТРЫ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ „БЕСКОНЕЧНОСТИ"

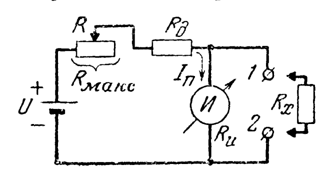
Регулировка „бесконечности" может осуществляться с помощью реостата $R_ш$, включенного параллельно индикатору, в соответствии со схемой фиг. 31. Эта схема рассчитывается таким образом, чтобы при $U = U_{мин}$,

$R_ш = R_{ш\ макс}$ и $R_x = \infty$ через индикатор протекал ток полного отклонения $I_п$. Если же напряжение питания превышает минимальное, ток через индикатор понижается до $I_п$ путем уменьшения величины шунтирующего индикатор сопротивления $R_ш$.

Входное сопротивление рассматриваемой схемы определяется тремя параллельно включенными сопротивлениями $R_и$, $R_ш$ и $R_д$. Изменение сопротивления $R_ш$ в процессе регулировки „бесконечности" вызывает заметное изменение входного сопротивления омметра и возрастание дополнительной погрешности измерений, которая может



Фиг. 34. Схема омметра с параллельным включением регулятора „бесконечности".



Фиг. 35. Схема омметра с последовательным включением регулятора „бесконечности" при $R_i \approx R_и$.

достигать весьма значительной величины. По этой причине омметры с параллельным включением регулятора „бесконечности" не находят практического применения.

Значительно лучшие результаты дает омметр с последовательным включением регулятора „бесконечности", схема которого изображена на фиг. 35. Эта схема рассчитывается таким образом, чтобы при $U = U_{мин}$, $R = 0$ и $R_x = \infty$ через индикатор протекал ток $I_п$. Если же омметр работает при напряжении, превышающем минимальное, то перед началом измерений для установки стрелки на отметку „∞" вводится реостат R, уменьшающий величину тока в цепи до $I_п$.

По аналогии со схемой фиг. 8 добавочное сопротивление омметра определяется формулой (5), а полное сопротивление реостата установки „бесконечности" выбирается из условия (6).

Входное сопротивление рассматриваемой схемы

$$R_i = \frac{R_и (R_д + R)}{R_и + R_д + R} = \frac{R_и}{1 + \frac{R_и}{R_д + R}}.$$

Изменение сопротивления реостата R в процессе регулировки „бесконечности" приводит к изменению входного сопротивления и появлению дополнительной погрешности измерений. Однако величина этой погрешности сравнительно невелика, так как сумма сопротивлений $R_д + R$ при любом значении R обычно значительно превышает сопротивление цепи индикатора $R_и$.

Учитывая, что общее сопротивление схемы омметра по отношению к источнику питания определяется формулой (7), получаем формулу, определяющую зависимость входного сопротивления от напряжения питания:

$$R_i = R_и \left(1 - \frac{I_п R_и}{U}\right). \qquad (63)$$

Обозначая через R_{i0} входное сопротивление омметра при расчетном напряжении питания U_0 и учитывая, что отсчет по шкале омметра пропорционален его входному сопротивлению, находим величину относительной дополнительной погрешности омметра, обусловленную изменением напряжения питания:

$$K_д = \frac{R_{x0} - R_x}{R_{x0}} = \frac{R_{i0} - R_i}{R_{i0}} = \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)\left(\frac{U_0}{I_п R_и} - 1\right)},$$

где

$$\varepsilon = \frac{U_0 - U}{U_0}.$$

Из формулы следует, что точность измерений омметра будет возрастать как при увеличении напряжения питания, так и при выборе индикатора с меньшим падением напряжения $I_п R_и$. Это вытекает из того, что в обоих случаях возрастает необходимая величина добавочного сопротивления $R_д$, что приводит к меньшей зависимости входного сопротивления от напряжения питания.

Максимально возможная дополнительная погрешность измерений

$$K_{д\,макс} = \frac{\varepsilon_{макс}}{(1-\varepsilon_{макс})\left(\frac{U_0}{I_п R_и} - 1\right)}. \qquad (64)$$

Если $U_0 = \frac{U_{макс} + U_{мин}}{2}$, то наибольшая дополнительная погрешность будет иметь место при напряжении $U_{мин}$, когда коэффициент $\varepsilon_{макс} = \frac{U_0 - U_{мин}}{U_0}$ положителен.

При заданных значениях $\varepsilon_{макс}$ и $K_{д\,макс}$ расчетное напряжение питания должно удовлетворять условию

$$U_0 \geqslant I_п R_и \left[1 + \frac{\varepsilon_{макс}}{(1-\varepsilon_{макс}) K_{д\,макс}}\right].$$

Учитывая, что по абсолютной величине

$$\varepsilon_{макс} = \frac{U_0 - U_{мин}}{U_0} = \frac{U_{макс} - U_0}{U_0},$$

откуда

$$U_{макс} = U_0 (1 + \varepsilon_{макс}),$$

находим формулу, определяющую выбор максимального напряжения питания, обеспечивающего заданную точность измерений:

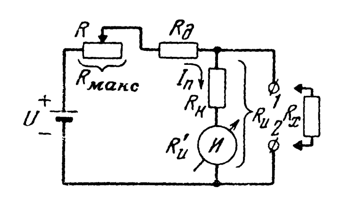
$$U_{макс} \geqslant I_п R_и (1 + \varepsilon_{макс}) \left[1 + \frac{\varepsilon_{макс}}{(1-\varepsilon_{макс}) K_{д\,макс}}\right]. \quad (65)$$

Выше было показано, что обычно $R_i \approx R_и$ (причем $R_i < R_и$). Поэтому иногда оказывается удобным применять последнюю формулу в следующем виде:

$$U_{макс} > I_п R_{i0} (1 + \varepsilon_{макс}) \left[1 + \frac{\varepsilon_{макс}}{(1-\varepsilon_{макс}) K_{д\,макс}}\right]. \quad (66)$$

Схема фиг. 35 применяется в том случае, если желательно иметь входное сопротивление омметра, примерно равное сопротивлению индикатора. Если входное сопротивление должно превышать сопротивление рамки индикатора, которое в данном случае обозначим через $R_и'$, то омметр собирается по схеме фиг. 36. В этом случае увеличивают сопротивление цепи индикатора $R_и$, что достигается включением последовательно с индикатором сопротивления

$$R_к = R_и - R_и'. \quad (67)$$



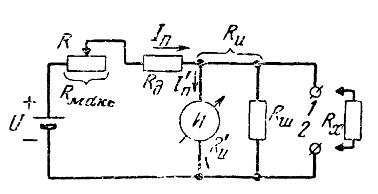
Фиг. 36. Схема омметра с последовательным включением регулятора „бесконечности" при $R_i > R_и'$.

Для получения входного сопротивления R_{i0} при расчетном напряжении питания U_0 необходимая величина сопротивления цепи индикатора $R_и$ определяется путем решения квадратного уравнения

$$R_и^2 - \frac{U_0}{I} R_и + \frac{U_0}{I_п} R_{i0} = 0, \quad (68)$$

которое вытекает из формулы (63). Наличие двух корней уравнения объясняется тем, что данное входное сопротивление R_{i0} может быть получено при двух значениях R_u. Большой точности измерений отвечает меньшее значение R_u, которое и следует брать при расчете.

Необходимо отметить, что повышение входного сопротивления омметра в результате увеличения сопротивления цепи индикатора не всегда оказывается выгодным, так как оно может привести к необходимости значительного увеличения напряжения питания для обеспечения заданной точности измерения.



Фиг. 37. Схема омметра с последовательным включением регулятора „бесконечности" при $R_i < R'_u$.

Если требуемое входное сопротивление меньше сопротивления индикатора, омметр собирается по схеме фиг. 37. В этой схеме параллельно индикатору, сопротивление рамки которого обозначим через R'_u, а ток полного отклонения — через I'_n, включается шунт $R_ш$, уменьшающий общее сопротивление цепи индикатора и шунта до величины

$$R_u = \frac{R'_u R_ш}{R'_u + R_ш}.$$

Включение шунта понижает чувствительность индикатора и увеличивает ток в цепи питания, необходимый для отклонения стрелки на всю шкалу, до значения

$$I_n = \frac{I'_n R'_u}{R_u}, \tag{69}$$

что следует учитывать при выборе типа источника питания. Уменьшение входного сопротивления путем шунтирования индикатора не требует увеличения напряжения питания.

Общее сопротивление цепи индикатора и шунта, обеспечивающее получение данного входного сопротивления R_{i0}, определяется формулой

$$R_u = \frac{R_{i0}}{1 - \dfrac{I'_n R'_u}{U_0}}. \tag{70}$$

Сопротивление шунта к индикатору выбирается равным:

$$R_ш = \frac{R'_и R_и}{R'_и - R_и}. \quad (71)$$

24. РАСЧЕТ ОММЕТРОВ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ РЕГУЛЯТОРА „БЕСКОНЕЧНОСТИ“

Пример 8. Рассчитать параллельную схему омметра на предел измерений $20 \div 500$ *ом* $\left(\frac{R_{x\ макс}}{R_{x\ мин}} = 25\right)$ при допустимой основной относительной погрешности $K_{макс} \leqslant 20\%$. Индикатор омметра — миллиамперметр типа М-51 класса 2,5 — имеет следующие данные: $I'_n = 5$ *ма*; $R'_и = 15$ *ом*. При изменении напряжения питания в пределах $\pm 20\%$ от расчетного значения ($\varepsilon_{макс} = 0,2$, что соответствует $\frac{U_{макс}}{U_{мин}} = \frac{1 + \varepsilon_{макс}}{1 - \varepsilon_{макс}} = 1,5$) дополнительная погрешность не должна превышать 5% ($K_{д\ макс} \leqslant 0,05$).

1. На графике фиг. 33 по кривой, соответствующей $K_и = 2,5\%$, находим, что при $K_{макс} = 20\%$

$$\frac{R_{x\ макс}}{R_i} \approx 7, \quad \frac{R_{x\ мин}}{R_i} \approx 0,16, \quad \frac{R_{x\ макс}}{R_{x\ мин}} \approx 44.$$

Следовательно, омметр может иметь один предел измерений. При заданном отношении $\frac{R_{x\ макс}}{R_{x\ мин}} = 25$ основная погрешность измерений не превышает 17,5%.

2. Выбираем входное сопротивление по формуле (4):

$$R_{i0} = \sqrt{20 \cdot 500} = 100\ ом.$$

3. Так как $R_{i0} > R'_и$, определяем, что схема омметра соответствует фиг. 36, для которой $I_n = I'_n$.

4. Максимально необходимое напряжение питания находим по формуле (66):

$$U_{макс} > 5 \cdot 10^{-3} \cdot 100\,(1 + 0,2)\left[1 + \frac{0,2}{(1 - 0,2)\,0,05}\right] = 3,6\ в.$$

Выбираем в качестве источника питания трехэлементную батарею типа КБС, обеспечивающую напряжение $U_{макс} = 4,5$ *в*.

5. Минимально допустимое напряжение питания

$$U_{мин} = \frac{4,5}{1,5} = 3\ в.$$

6. Расчетное напряжение питания

$$U_0 = \frac{4,5+3}{2} = 3,75 \ \textit{в}.$$

7. Сопротивление цепи индикатора определяется из квадратного уравнения (68):

$$R_и^2 - \frac{3,75}{5 \cdot 10^{-3}} R_и + \frac{3,75}{5 \cdot 10^{-3}} \cdot 100 = 0.$$

Решение этого уравнения: $R_и = 375 \pm 255$ *ом*.

Берем меньшее значение $R_и = 120$ *ом*.

8. Максимально возможную дополнительную погрешность измерений определяем по формуле (64):

$$K_{д\,макс} = \frac{0,2}{(1-0,2)\left(\frac{3,75}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 120} - 1\right)} = 0,0477,$$

т. е. не превышает 4,77%.

9. Добавочное сопротивление в цепи индикатора

$$R_к = R_и - R'_и = 120 - 15 = 105 \ \textit{ом}.$$

10. Добавочное сопротивление в цепи питания определяем по формуле (5):

$$R_д = \frac{3}{5 \cdot 10^{-3}} - 120 = 480 \ \textit{ом}.$$

11. Сопротивление реостата установки „бесконечности" определяется по формуле (6):

$$R_{макс} \geqslant \frac{4,5-3}{5 \cdot 10^{-3}} = 300 \ \textit{ом}.$$

12. Максимально возможный ток в цепи питания (при $U = U_{макс}$, $R = 0$ и $R_x = 0$)

$$I_{макс} = \frac{U_{макс}}{R_д} = \frac{4,5}{480} = 9,4 \cdot 10^{-3} \ \textit{а} = 9,4 \ \textit{ма}.$$

13. Градуировка шкалы омметра (в омах) определяется формулой (62).

Пример 9. Рассчитать параллельную схему омметра на предел измерений $0,2 \div 5$ *ом* $\left(\frac{R_{x\,макс}}{R_{x\,мин}} = 25\right)$ при допустимой основной относительной погрешности $K_{макс} \leqslant 20\%$. Индикатор омметра — миллиамперметр типа М-51 класса 2,5 — имеет следующие данные: $I'_п = 0,005$ *а*; $R'_и = 15$ *ом*. При изменении напряжения питания в пределах $\pm 13\%$ от расчетного значения ($\varepsilon_{макс} = 0,13$, что соответствует $\frac{U_{макс}}{U_{мин}} = \frac{1+\varepsilon_{макс}}{1-\varepsilon_{макс}} = 1,3$) дополнительная погрешность не должна превышать 2% ($K_{д\,макс} \leqslant 0,02$).

1. По аналогии с примером 8 находим, что омметр может иметь один предел измерений, для которого основная погрешность измерений не будет превышать 17,5%.

2. Выбираем входное сопротивление по формуле (4):

$$R_{i0} = \sqrt{0,2 \cdot 5} = 1 \text{ ом}.$$

3. Так как $R_{i0} < R'_u$, определяем, что схема омметра соответствует фиг. 37.

4. Максимально необходимое напряжение питания (учитывая, что $I_n R_u = I'_n R'_u$) находим по формуле (65):

$$U_{макс} \geqslant 0,005 \cdot 15 (1 + 0,13) \left[1 + \frac{0,13}{(1 - 0,13)\, 0,02} \right] = 0,72 \text{ в}.$$

Выбираем в качестве источника питания щелочной аккумулятор НКН-10, обеспечивающий напряжение $U_{макс} = 1,3$ *в*.

5. Минимально допустимое напряжение питания

$$U_{мин} = \frac{1,3}{1,3} = 1 \text{ в}.$$

6. Расчетное напряжение питания

$$U_0 = \frac{1,3 + 1}{2} = 1,15 \text{ в}.$$

7. Общее сопротивление рамки индикатора и шунта находим по формуле (70):

$$R_u = \frac{1}{1 - \dfrac{0,005 \cdot 15}{1,15}} = 1,07 \text{ ом}.$$

8. Сопротивление шунта находим по формуле (71):

$$R_ш = \frac{15 \cdot 1,07}{15 - 1,07} = 1,15 \text{ ом}.$$

9. Величину тока в цепи питания при $R_x = \infty$ находим по формуле (69):

$$I_n = \frac{0,005 \cdot 15}{1,07} = 0,07 \text{ а} = 70 \text{ ма}.$$

10. Максимально возможную дополнительную погрешность находим по формуле (64):

$$K_{д\, макс} = \frac{0,13}{(1 - 0,13)\left(\dfrac{1,15}{0,07 \cdot 1,07} - 1\right)} = 0,01.$$

11. Данные остальных элементов схемы омметра находим по формулам (5) и (6):

$$R_д = \frac{1}{0,07} - 1,07 = 13,2 \text{ ом};$$

$$R_{макс} \geqslant \frac{1,3 - 1}{0,07} = 4,3 \text{ ом}.$$

Выбираем $R_{макс} = 5$ *ом*.

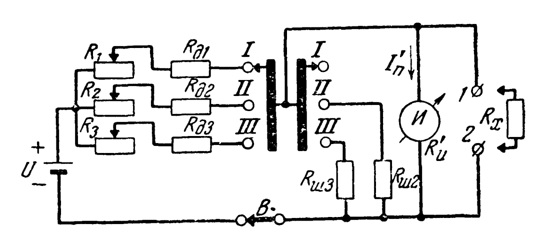
12. Максимально возможный ток в цепи питания (при $U = U_{макс}$, $R = 0$ и $R_x = 0$)

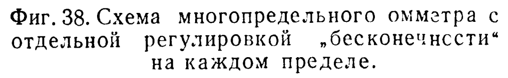
$$I_{макс} = \frac{U_{макс}}{R_д} = \frac{1,3}{13,2} = 0,1\ а = 100\ ма.$$

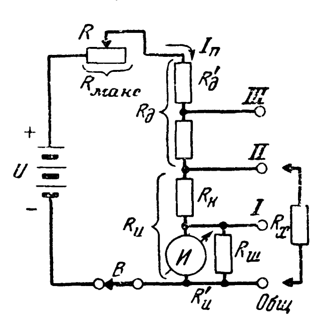
13. Градуировка шкалы омметра (в смах) определяется формулой (62).

25. РАСШИРЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕРЕНИЙ ОММЕТРОВ

Пределы измерений параллельных схем омметров, так же как и последовательных схем, ограничиваются неравномерностью шкалы, на краях которой основная погрешность измерений сильно возрастает. Задача расширения пределов измерений разрешается путем применения многопредельных омметров. Переход с одного предела измерений на другой осуществляется посредством изменения входного сопротивления омметра.




Фиг. 38. Схема многопредельного омметра с отдельной регулировкой „бесконечности" на каждом пределе.



Фиг. 39. Схема многопредельного омметра с общим регулятором „бесконечности".

На фиг. 38 приведена схема трехпредельного омметра, предназначенного для измерения малых сопротивлений. При данной схеме омметр рассчитывается раздельно на каждый предел измерений. Так как в схеме получение малых входных сопротивлений достигается шунтированием индикатора, ток в цепи питания при переключении пределов резко изменяется. Поэтому при каждом пределе измерений для регулировки „бесконечности" приходится включать отдельный реостат, что усложняет конструкцию прибора. Кроме того, при малых входных сопротивлениях точность измерений будет понижаться из-за влияния переходных сопротивлений контактов в цепи шунтов. Вследствие указанных недостатков данная схема применяется редко.

Более совершенной является схема многопредельного омметра, приведенная на фиг. 39. Эта схема позволяет изменять входное сопротивление посредством изменения соотношения между сопротивлением $R_к$, включенным в цепь индикатора, и добавочным сопротивлением $R_д$ при неизменном общем сопротивлении $R_д + R_к$.

В схеме омметра фиг. 39 сопротивление шунта $R_ш$ определяется из условия получения при пределе измерений I наименьшего входного сопротивления $R_i = R_{i\,мин}$, причем при расчете его величины можно пренебрегать шунтирующим действием цепи питания. Следовательно,

$$R_ш = \frac{R'_u R_{i\,мин}}{R'_u - R_{i\,мин}}. \qquad (72)$$

В том случае, если $R_{i\,мин} \geqslant R'_u$, шунт $R_ш$ отсутствует и при пределе измерений I последовательно с индикатором включается сопротивление $R_{i\,мин} - R'_u$.

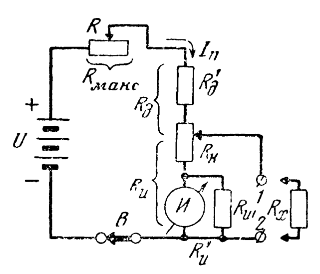
При пределе измерений с наименьшим входным сопротивлением точность измерений наибольшая, так как изменение сопротивления реостата R в процессе установки „бесконечности“ будет очень мало влиять на величину входного сопротивления. С возрастанием R_i погрешность измерений увеличивается. Поэтому максимальное напряжение питания выбирается из условия обеспечения необходимой точности измерений при пределе измерений III с наибольшим входным сопротивлением $R_{i3} = R_{i\,макс}$ в соответствии с формулой (66), в которой

$$I_n = \frac{I'_n R'_u}{R_{i\,мин}}. \qquad (73)$$

При заданном диапазоне измеряемых сопротивлений необходимое число пределов измерений определяется точно так же, как и для последовательных схем омметров (см. § 9), в зависимости от класса точности индикатора и допустимой основной погрешности. Коэффициент перекрытия N обычно берется равным 10, так как это позволяет использовать одну и ту же шкалу для отсчета при всех пределах измерений. Тип источника питания зависит от величины тока в цепи питания. Необходимые сопротивления отдельных участков схемы омметра определяются путем расчета величин $R_д$ и $R_к$ для каж-

дого предела измерений по формулам, приведенным в § 23.

Интересным вариантом рассмотренной схемы является схема многопредельного омметра с плавной регулировкой предела измерений, изображенная на фиг. 40. В этой схеме с помощью потенциометра $R_к$ осуществляется плавное изменение предела измерений. Нижнее (по схеме) положение ползунка потенциометра соответствует наименьшему входному сопротивлению $R_{i\,мин}$, из условия получения которого и рассчитывается сопротивление шунта $R_ш$. Для этого входного сопротивления производится градуировка шкалы омметра. При перемещении ползунка вверх входное сопротивление омметра плавно увеличивается. Максимальное напряжение питания, так же как и для схемы фиг. 39, выбирается из условия обеспечения заданной точности измерений при входном сопротивлении $R_{i\,макс}$, которому соответствует верхнее положение ползунка.

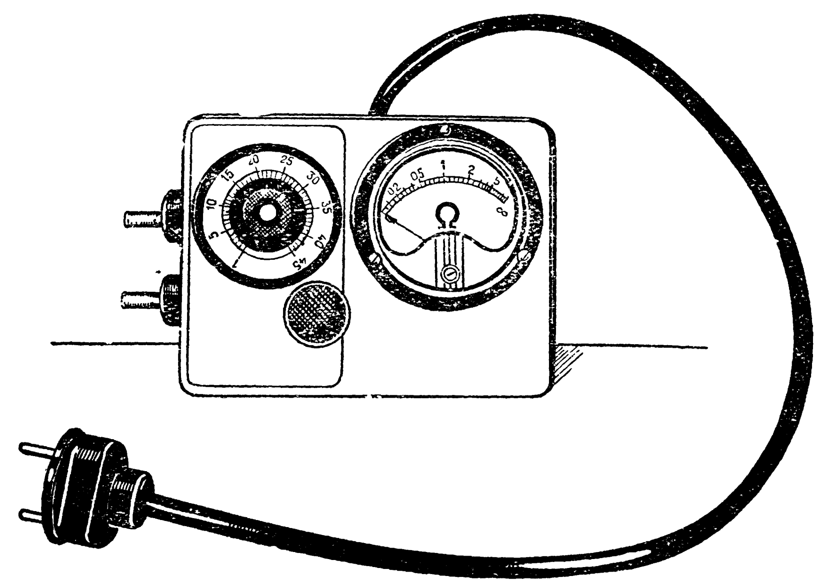


Фиг. 40. Схема многопредельного омметра с плавной регулировкой предела измерений.

Потенциометр $R_к$ можно снабдить вспомогательной шкалой с отметками, фиксирующими положения ползунка, при которых входное сопротивление омметра увеличивается по сравнению с $R_i = R_{i\,мин}$ в 1, 2, 3, 4, 5, ..., 10, ...,20 и т. д. раз. В этом случае величина R_x будет определяться как произведение показаний, снимаемых по шкале омметра, и множителя, отсчитываемого по шкале потенциометра. Положение ползунка потенциометра подбирается таким, чтобы отсчет производился в средней части шкалы омметра. Внешний вид подобного омметра на общий предел измерений 0,05÷900 *ом* показан на фиг. 41.

Основным достоинством омметров, выполненных по схемам фиг. 39 и 40, является то, что регулировка „бесконечности“, произведенная при одном пределе измерений, будет сохраняться при переходе к другим пределам. Эти схемы имеют и существенный недостаток, заключающийся в том, что ток в цепи питания при всех пре-

делах измерений имеет значительную величину, равную току в цепи питания при использовании предела измерений с наименьшим входным сопротивлением, а напряжение питания должно иметь при всех пределах измерений величину, необходимую для предела измерений с наибольшим входным сопротивлением. Кроме того, при работе по схеме фиг. 40 погрешность измерений несколько увеличивается вследствие возможной неточности градуировки и отсчета по шкале потенциометра.



Фиг. 41. Омметр с плавной регулировкой предела измерений.

Уменьшение входного сопротивления омметра при параллельной схеме, достигаемое шунтированием индикатора, так же как и при последовательной схеме, ограничивается увеличением тока в цепи питания и возрастанием влияния внутреннего сопротивления источника питания. Однако при параллельной схеме входное сопротивление при прочих равных условиях может быть получено значительно меньшей величины, чем при последовательной схеме. В этом легко убедиться, рассматривая схему омметра, изображенную на фиг. 42.

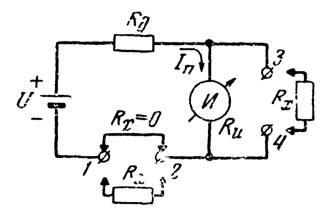
При разомкнутых зажимах *3* и *4* и подключении измеряемого сопротивления R_x к зажимам *1* и *2* схема фиг. 42

является последовательной и имеет входное сопротивление, определяемое формулой (2). При замкнутых накоротко зажимах *1* и *2* и подключении измеряемого сопротивления к зажимам *3* и *4* схема омметра превращается в параллельную и имеет входное сопротивление, определяемое формулой (63).

Отношение входных сопротивлений

$$\frac{R_{i\,посл}}{R_{i\,пар}}=\frac{U^2}{I_nR_u(U-I_nR_u)}=\frac{\left(\frac{U}{I_nR_u}\right)^2}{\frac{U}{I_nR_u}-1}.$$

Полагая, что источник питания состоит из одного элемента, дающего напряжение $U=1{,}25$ *в*, и учитывая, что возможная величина падения напряжения на индикаторе $I_nR_u=$ $=0{,}03\div0{,}25$ *в*, можно найти, что отношение $\frac{R_{i\,посл}}{R_{i\,пар}}=6\div43$.



Фиг. 42. Простейшая последовательно-параллельная схема омметра.

Следовательно, один и тот же омметр при работе по параллельной схеме имеет входное сопротивление, от 6 до 43 раз меньшее, чем при работе по последовательной схеме. При увеличении напряжения питания или выборе индикатора с меньшим падением напряжения I_nR_u это отношение еще больше возрастает.

В § 11 было показано, что минимально допустимая величина входного сопротивления последовательной схемы ограничивается значением, определяемым выражением (57). Учитывая, что при питании от сухих батарей для последовательных схем омметров $R_{i\,доп}\approx20$ *ом*, можно найти величину наименьшего входного сопротивления, которое батарейный омметр может иметь при работе по параллельной схеме:

$$R_{i\,доп}=\frac{20}{43\div6}\approx0{,}5\div3\ ом.$$

Следовательно, даже при питании от сухих батарей входное сопротивление параллельной схемы может быть получено порядка 1 *ом*, что позволит измерять омметром сопротивления порядка десятых долей ома. Если же в качестве источника питания использовать аккумулятор,

например типа НКН-10, с номинальным напряжением $U_э = 1{,}25$ *в* и допустимым током разряда $I_{доп} = 1{,}25$ *а*, то в этом случае для последовательной схемы $R_{i\ доп} = 1$ *ом*, а для параллельной схемы оно может быть получено порядка 0,05 *ом*. Такой омметр позволит измерять сопротивления порядка тысячных долей ома. Для изготовления омметра с еще меньшим входным сопротивлением источник питания следует выбирать еще большей емкости. При этом следует учитывать, что увеличение емкости источника обычно сопровождается уменьшением его внутреннего сопротивления.

В параллельных схемах с последовательным включением регулятора „бесконечности" величина внутреннего сопротивления источника питания на точность измерений совершенно не влияет, так как оно включено последовательно с реостатом R и автоматически компенсируется при установке „бесконечности". Влияние внутреннего сопротивления может иногда сказываться в том, что при напряжении $U_{мин}$ невозможно осуществить установку „бесконечности". Во избежание этого можно действительную величину $R_д$ брать несколько меньшей (на 10—20%) расчетного значения, соответственно увеличивая полное сопротивление реостата $R_{макс}$.

Применять параллельную схему омметра для измерения больших сопротивлений нерационально, так как в этом случае для получения нужного входного сопротивления потребуется значительно большее напряжение питания, чем при работе омметра по последовательной схеме. Поэтому основной областью применения омметров, работающих по параллельной схеме, является измерение малых сопротивлений.

26. РАСЧЕТ ОММЕТРА С ПЛАВНОЙ РЕГУЛИРОВКОЙ ПРЕДЕЛА ИЗМЕРЕНИЙ

Пример 10. Рассчитать омметр по схеме фиг. 40 на предел измерений $R_{x\ мин} \div R_{x\ макс} = 0{,}2 \div 250$ *ом* при допустимой основной относительной погрешности $K_{макс} \leqslant 17{,}5\%$. Индикатор омметра — миллиамперметр типа МК-55 класса 2,5 — имеет следующие данные: $I'_n = 15$ *ма*; $R'_u = 5$ *ом*. При изменении напряжения питания в пределах $\pm 20\%$ от расчетного значения ($\varepsilon_{макс} = 0{,}2$, что соответствует

$\frac{U_{макс}}{U_{мин}} = 1{,}5$) дополнительная погрешность не должна превышать 5% ($K_{д\ макс} \leqslant 0{,}05$).

1. По графику фиг. 33 находим, что при $K_u = 2{,}5\%$ и $K_{макс} = 17{,}5\%$

$$\frac{R_{x\ мин}}{R_i} \approx 0{,}2, \text{ а } \frac{R_{x\ макс}}{R_i} \approx 5{,}5.$$

Учитывая, что измерение $R_{x\ мин}$ производится при входном сопротивлении $R_{i\ мин}$, а измерение $R_{x\ макс}$ — при входном сопротивлении $R_{i\ макс}$, определяем:

$$R_{i\ мин} \approx \frac{R_{x\ мин}}{0{,}2} = 1 \ ом; \ R_{i\ макс} \approx \frac{R_{x\ макс}}{5{,}5} = 45{,}5 \ ом.$$

Выбираем $R_{i\ мин} = 1$ *ом*, а $R_{i\ макс} = 45$ *ом*.

2. Сопротивление шунта находим по формуле (72):

$$R_ш = \frac{5 \cdot 1}{5 - 1} = 1{,}25 \ ом.$$

3. Ток в цепи питания, необходимый для отклонения стрелки индикатора на всю шкалу при $R_x = \infty$, находим по формуле (73):

$$I_п = \frac{15 \cdot 10^{-3} \cdot 5}{1} = 0{,}075 \ а = 75 \ ма.$$

4. Максимально необходимое напряжение питания находим по формуле (66) для $R_{i0} = R_{i макс}$:

$$U_{макс} > 75 \cdot 10^{-3} \cdot 45 (1 + 0{,}2) \left[1 + \frac{0{,}2}{(1 - 0{,}2)\, 0{,}05} \right] = 24{,}3 \ в.$$

Выбираем в качестве источника питания аккумуляторную батарею типа 12-А-10, напряжение которой может достигать после заряда величины $U_{макс} = 30$ *в*.

5. $U_{мин} = \frac{30}{1{,}5} = 20$ *в*.

6. $U_0 = \frac{30 + 20}{2} = 25$ *в*.

7. Наибольшее сопротивление цепи индикатора определяется из решения квадратного уравнения (68):

$$R^2_{и\ макс} - \frac{25}{0{,}075} R_{и\ макс} + \frac{25}{0{,}075} \cdot 45 = 0.$$

Решение этого уравнения: $R_{и\ макс} = 167 \pm 113$ *ом*.

Искомое решение: $R_{и\ макс} = 54$ *ом*.

8. Необходимое сопротивление потенциометра

$$R_{к\ макс} = R_{и\ макс} - R_{i\ мин} = 54 - 1 = 53 \ ом.$$

9. Добавочное сопротивление находим по формуле (5):

$$R'_д = \frac{20}{0{,}075} - 54 = 214 \ ом$$

10. Полное сопротивление реостата установки „бесконечности“ находим по формуле (6):

$$R_{макс} \geqslant \frac{30 - 20}{0,075} = 133 \text{ ом}.$$

Выбираем $R_{макс} = 150$ *ом*, а $R_{д} = 200$ *ом*.

11. Градуировка шкалы индикатора производится для входного сопротивления $R_{i\,мин} = 1$ *ом* по формуле (62).

При этом общий предел измерений омметра примерно составит:

$$\frac{R_{i\,мин}}{20} \div 20 R_{i\,макс} = 0,05 \div 900 \text{ ом}.$$

12. Потенциометр $R_к$ позволяет изменять входное сопротивление омметра в 45 раз, в соответствии с чем и изготовляется шкала потенциометра, деления которой указывают множитель к шкале омметра. Градуировка шкалы потенциометра $R_к$ может быть произведена расчетным путем на основании решения уравнения (68) для различных входных сопротивлений от $R_i = 2$ *ом* до $R_{i\,макс} = 45$ *ом*. Для каждого входного сопротивления находится величина сопротивления потенциометра, включенного в цепь индикатора, равная $R_к = R_и - R_{i\,мин}$. Ниже приводится рассчитанная подобным образом табл. 2 для некоторых значений R_i.

Таблица 2

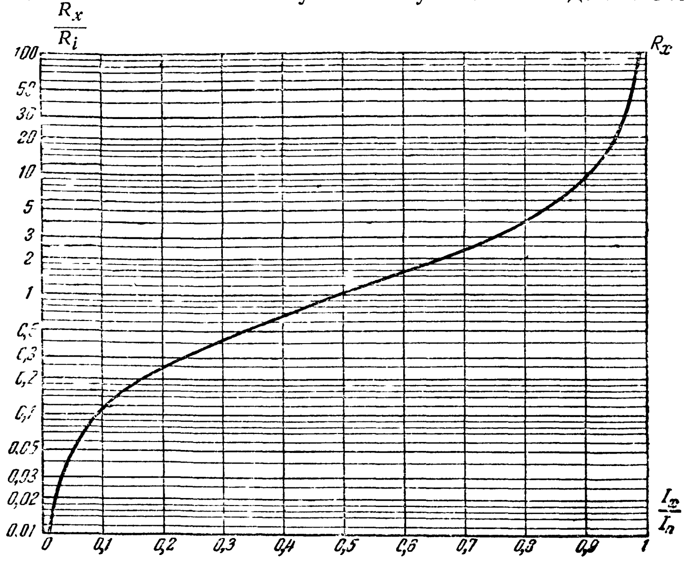
R_i, *ом*	1	2	3	4	5	7	10	15	20	25	30	35	40	45
$R_к$, *ом*	0	1	2	3	4	6,2	9,5	14,8	20,5	26,5	32,5	38,6	45,5	53

27. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОММЕТРОВ, РАБОТАЮЩИХ ПО ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СХЕМЕ

Расчет и изготовление омметров, работающих по параллельной схеме, имеют свои особенности. Измерение малых сопротивлений связано с увеличением тока в цепи питания. Это необходимо учитывать при выборе источника питания, в качестве которого могут использоваться сухие и аккумуляторные батареи, выпрямители, работающие от сети переменного тока, или индукторы. Напряжение на зажимах источника в большинстве случаев может быть невелико, но он должен обеспечивать необходимый ток в цепи питания, который при измерении очень малых сопротивлений может достигать десятков ампер.

Уменьшения величины питающего тока можно достигнуть рациональным выбором индикатора омметра. Применять чувствительные индикаторы в омметрах, работаю-

щих по параллельной схеме, нет необходимости. Чувствительные индикаторы обычно имеют большое сопротивление, вследствие чего для получения малого входного сопротивления их приходится шунтировать. Малочувствительные индикаторы наоборот, имеют малое сопротивление рамки, что облегчает получение нужного входного сопро-



Фиг. 43. Градуировочная кривая параллельных схем омметров.

тивления. Основным показателем при выборе индикатора должна служить величина падения напряжения $I'_n R'_u$, необходимая для отклонения стрелки на всю шкалу. Чем меньше эта величина, тем меньше будет ток в цепи питания при данном входном сопротивлении, тем выше будет точность измерений. Обычно величина $I'_n R'_u$ оказывается меньшей для малочувствительных индикаторов.

Изготовление шкалы омметра, собранного по параллельной схеме, производится в том же порядке, что и для омметра, собранного по последовательной схеме. Градуировка шкалы определяется формулой (62).

Зависимость, выраженная этой формулой, в графическом виде представлена на фиг. 43.

Для более точного построения шкалы омметра может быть использована приводимая ниже градуировочная таблица (табл. 3).

Таблица 3

$\frac{R_x}{R_i}$	$\frac{I_x}{I_n}$	$\frac{R_x}{R_i}$	$\frac{I_x}{I_n}$	$\frac{R_x}{R_i}$	$\frac{I_x}{I_n}$	$\frac{R_x}{R_i}$	$\frac{I_x}{I_n}$	$\frac{R_x}{R_i}$	$\frac{I_x}{I_n}$
0	0	0,20	0,167	0,50	0,333	1,5	0,600	4,0	0,800
0,01	0,01	0,22	0,180	0,55	0,355	1,6	0,615	4,5	0,818
0,02	0,02	0,24	0,194	0,60	0,375	1,7	0,630	5	0,833
0,03	0,029	0,26	0,206	0,65	0,394	1,8	0,643	6	0,856
0,04	0,039	0,28	0,219	0,70	0,412	1,9	0,655	7	0,875
0,05	0,048	0,30	0,231	0,75	0,428	2,0	0,667	8	0,889
0,06	0,057	0,32	0,243	0,80	0,444	2,2	0,688	9	0,900
0,07	0,066	0,34	0,254	0,85	0,459	2,4	0,705	10	0,909
0,08	0,075	0,36	0,265	0,90	0,473	2,6	0,722	15	0,937
0,09	0,083	0,38	0,276	0,95	0,486	2,8	0,736	20	0,952
0,10	0,091	0,40	0,286	1,0	0,500	3,0	0,750	30	0,967
0,12	0,107	0,42	0,296	1,1	0,524	3,2	0,762	40	0,975
0,14	0,123	0,44	0,305	1,2	0,545	3,4	0,773	50	0,980
0,16	0,138	0,46	0,315	1,3	0,565	3,6	0,783	∞	1,0
0,18	0,152	0,48	0,324	1,4	0,584	3,8	0,792	—	—

В омметрах, работающих по параллельной схеме, обычно применяются низкоомные постоянные и переменные сопротивления проволочного типа. При выборе диаметра провода для намотки сопротивления необходимо учитывать величину тока, протекающего по нему.

Подгонку необходимого входного сопротивления омметра проще всего производить при наличии низкоомного магазина сопротивлений. Величину постоянного сопротивления, включенного последовательно или параллельно в цепь индикатора, подгоняют таким образом, чтобы при подключении к входным зажимам омметра (после предварительной установки „бесконечности“) эталонного сопротивления, равного по величине входному, стрелка индикатора отклонилась точно до середины шкалы. Таким же образом может быть проградуирована шкала потенциометра $R_к$ многопредельного омметра фиг. 40.

В омметрах, рассчитанных на измерение очень малых сопротивлений (миллиомметрах и микроомметрах), необходимо учитывать сопротивление проводников, соединяющих цепь индикатора с входными зажимами. Эти соединения необходимо выполнять толстым проводом малого сопротивления. Сопротивления цепи индикатора, так же как и измеряемые сопротивления R_x, рекомендуется присоединять непосредственно к входным зажимам. Для

получения более точных результатов можно после установки „бесконечности“ замкнуть входные зажимы и замерить сопротивление соединительных проводников, которое при дальнейших измерениях следует вычитать из показаний омметра.

Зажимы миллиомметров и микроомметров должны быть выполнены так, чтобы они давали очень хороший контакт с измеряемым сопротивлением. Для получения небольшого переходного сопротивления выводы прибора иногда снабжаются толстыми, заостренными на конце металлическими щупами.

В многопредельных омметрах погрешность измерений может возрасти вследствие трудно учитываемого влияния сопротивления переходного контакта в цепи переключателя пределов измерений. Поэтому необходимо в омметрах применять переключатели и потенциометры с большими хорошо пружинящими металлическими контактными пластинами, обеспечивающими хороший контакт.

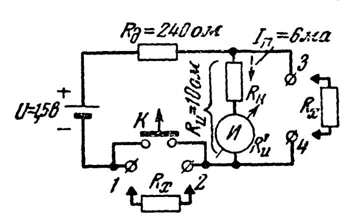
Батарейные омметры должны обязательно иметь выключатель в цепи питания во избежание разряда источника при неработающем омметре. В некоторых омметрах один из зажимов выполняется с автоматическим контактом, который замыкает цепь питания лишь при подключении измеряемого сопротивления к входным зажимам.

В сетевых омметрах, работающих по параллельной схеме, часто используются селеновые выпрямители, составленные из шайб большого диаметра, собираемых по мостовой схеме и подключаемых к питающей сети через понижающий трансформатор. Для стабилизации выпрямленного тока при возможных изменениях напряжения питающей сети или изменении нагрузки могут быть применены бареттеры.

28. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ ОММЕТРОВ

В том случае, если заданный диапазон измеряемых сопротивлений охватывает и малые и большие сопротивления, применяется комбинированная схема омметра, представляющая собой сочетание последовательной и параллельной схем. Простейшая схема двухпредельного омметра подобного типа была приведена на фиг. 42. Она находит применение лишь в некоторых типах омметров, в которых первоначальная регулировка осуществляется посредством магнитного шунта.

В качестве примера можно привести схему двухпредельного омметра типа М-471 с пределами измерений 100 и 10 000 *ом*, изображенную на фиг. 44. Источником питания данной схемы служит один сухой элемент типа ФБС, обеспечивающий максимальное напряжение 1,5 *в*. Индикатором омметра является прибор магнитоэлектрической системы, ток полного отклонения которого может регулироваться с помощью магнитного шунта в пределах 4,5 ÷ 6 *ма*, что позволяет компенсировать уменьшение напряжения питания до 1,12 *в*. Последовательно с индикатором включено небольшое сопротивление, величина которого подобрана таким образом, чтобы получить общее сопротивление цепи индикатора $R_и = 10$ *ом*.



Фиг. 44. Схема омметра типа М-471.

Величина добавочного сопротивления к омметру выбрана, исходя из формулы (1):

$$R_д = \frac{1,5}{0,006} - 10 = 240 \text{ ом}.$$

При пределе измерений 10 000 *ом* омметр работает по последовательной схеме с входным сопротивлением

$$R_i = R_д + R_и = 250 \text{ ом}.$$

Измеряемое сопротивление подключается к зажимам *1* и *2*. Перед началом измерений посредством магнитного шунта производится установка „нуля" при нажатой кнопке *К*.

При пределе измерений 100 *ом* омметр работает по параллельной схеме с входным сопротивлением

$$R_i \approx R_и = 10 \text{ ом}.$$

Измеряемое сопротивление подключается к зажимам *3* и *4*. Перед началом измерений посредством магнитного шунта при разомкнутых зажимах *3* и *4* производится установка „бесконечности". Кнопка *К* как при установке „бесконечности", так и во время измерений должна быть нажата, так как через нее замыкается цепь питания омметра.

Для каждого предела измерений омметр имеет свою шкалу, так как при одинаковом характере изменений измеряемого сопротивления отклонение стрелки на обоих пределах происходит в противоположных направлениях.

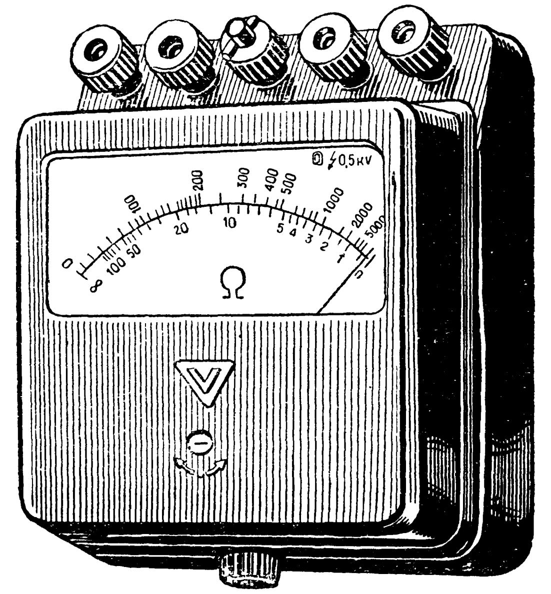
Внешний вид омметра типа М-471 показан на фиг. 45.

В универсальных приборах, где регулировка чувствительности индикатора недопустима, последовательно-параллельная схема омметра применяется редко вследствие малой точности измерений на одном из пределов.

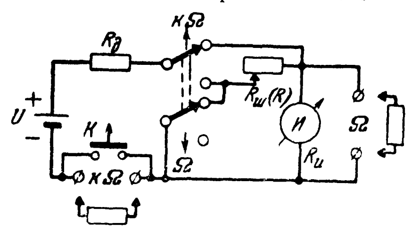
Известно, что схема с последовательным включением регулятора, позволяя получить высокую точность измерений при работе омметра по параллельной схеме, дает большую погрешность при работе омметра по последовательной схеме. Если же применена параллельная схема включения регулятора, то, наоборот, омметр, работающий по последовательной схеме, обеспечит гораздо бо́льшую

точность измерений, чем омметр, работающий по параллельной схеме.

Лучшие результаты могут быть получены в том случае, если предусмотрена возможность переключения реостата либо последовательно в цепь питания омметра при парал-



Фиг. 45. Омметр типа М-471.



Фиг. 46. Последовательно-параллельная схема омметра с переключаемым регулятором.

лельной схеме, либо параллельно индикатору при последовательной схеме. Подобная схема омметра показана на фиг. 46. Недостатком ее является наличие сложного переключателя.

Общим недостатком омметров, работающих по последовательно-параллельной схеме, является то, что они должны иметь отдельные шкалы для каждого типа схемы.

ЛИТЕРАТУРА

А. Ф. Шевцов, Любительские омметры, Радиоиздат, 1938.

Е. А. Свирский, Общий курс электрических и магнитных измерений, стр. 232-237, Гос. изд. оборонной промышленности, 1939.

Г. Г. Гинкин, Справочник по радиотехнике, стр. 658—663 и 666—692, Госэнергоиздат, 1948.

В. О. Арутюнов, Расчет и конструкции электроизмерительных приборов, стр. 232—237, Госэнергоиздат, 1949.

Г. П. Шкурин, Справочник по электроизмерительным и радиоизмерительным приборам, стр. 123—127, 296—321, 466—472 и 483—489, Военмориздат, 1950.

В. С. Попов, Электротехнические измерения и приборы, стр. 157—197, Госэнергоиздат, 1952.

С. Степанов, Расчет многошкальных измерительных приборов, Изд. ДОСААФ, 1952.

Радиолюбительская измерительная аппаратура, стр. 10—19 и 22—33, Госэнергоиздат (Массовая радиобиблиотека), 1949.

Р. М. Малинин, Самодельные омметры и авометры, Госэнергоиздат (Массовая радиобиблиотека), 1949.

Приборы радиолюбительской лаборатории, стр. 37—46, Госэнергоиздат (Массовая радиобиблиотека), 1949.

К. Д. Осипов, Ламповый вольтметр, стр. 42—47, Госэнергоиздат (Массовая радиобиблиотека), 1950.

Г. А. Сницерев, Простейшие измерения, стр. 65—80, Госэнергоиздат (Массовая радиобиблиотека), 1950.

Аппаратура для ремонта и налаживания приемников, стр. 3—15 и 38—45, Госэнергоиздат (Массовая радиобиблиотека), 1950.

В. Енютин, Любительские измерительные приборы, „Радио“, 1947, № 8, стр. 29—31.

Р. Михайлов, Мост для измерения сопротивлений, „Радио“, 1948, № 1, стр. 34.

Б. Хитров, Омметр с питанием от сети, „Радио“, 1948, № 2, стр. 49—51 и № 7, стр. 64.

К. Петров, Упрощенная схема моста для измерения *R*, „Радио“, 1948, № 7, стр. 49.

М. Жук, Катодный вольтомметр ВК-2, „Радио“, 1948, № 10, стр. 30—31.

В. Попов, Измерение больших *R* при помощи вольтметра, „Радио“, 1948, № 10, стр. 43.

П. Шабанов, Многопредельный омметр, „Радио“, 1949, № 3, стр. 46—47.

С. Матлин, Мегомметр МОМ-1, „Радио“, 1951, № 2, стр. 50—52.

Е. Левитин, Измерения в практике радиолюбителя, „Радио“, 1954, № 3, стр. 57—60.

СОДЕРЖАНИЕ

Начало см. на 2-й стр. обложки

Тип	Основная погрешность	I_n	R_u	$I_n \cdot R_u$	Длина шкалы	Вес
	%	*ма*	*ом*	*в*	*мм*	*кг*
М-61	± 5	5 10 15	15 7,5 5	0,075	31	0,085
М-494	± 2,5	0,05 0,1	2 000 700	0,1 0,07	61,5	0,3
М-49	± 2,5	0,2 0,3 0,5	700 350 350	0,14 0,105 0,175	61,5	0,3
М-495	± 1,5	0,05 0,1	2 600 800	0,13 0,08	60	0,33
М-598	± 2,5	0,05 0,1	2 600 800	0,13 0,08	41,5	0,18
М-592	± 2,5	0,2 0,3 0,5	800 500 500	0,16 0,15 0,25	41,5	0,18
ИТ	± 2,5	0,15	1 500	0,225	60	0,35

Цена 2 р. 70 к.